MICHAEL ESFELD

prefață de Mauro Dorato

Filosofia Naturii

Fizică și ontologie

Fizică

Seria de filosofie

Seria Fizică. Filosofie ISSN 2499-6408

Inspirată de ideea unei noi Filosofii a Naturii, *Physis* își propune să fie un spațiu de publicare pentru lucrări care se concentrează asupra naturii în multiplele sale aspecte și un loc de integrare și comparare între diferite domenii ale cunoașterii și tradiții filosofice.

Regizat de către
Emilio Carlo Corriero | Ian Hamilton Grant

Comitetul Științific Internațional
Remo Bodei | Massimo Cacciari | Michael Esfeld | Manfred Frank | Sergio Givone | Jason Wirth

MICHAEL ESFELD

Filosofia Naturii

Fizică și ontologie

prefață de Mauro Dorato

tradus de Tiziano Ferrando, Andrea Oldofredi și Olga Sarno

Rosenberg și Sellier

© 2018 Rosenberg & Sellier

Publicație pusă la dispoziție
în termenii licenței Creative Commons
Atribuire-NecomercialăFărăDerivate 4.0

www.rosenbergesellierit

taenbagicSdlier este o marcă înregistrată utilizată sub licență a companiei Traumann ss

prima ediție italiană, noiembrie 2018

ISBN 978-88-7885-652-3

LEXIS Publishing Company din Torino srl prin Carlo Alberto 55
I-10123 Torino rosenberg&sellier@lexis.srl

INDEX

Prefață de Mauro Dorato

Prefața autorului

1. *Atomismul clasic*
   - 1.1. Ce este metafizica naturii?
   - 1.2. Ideea de atomism
   - 1.3. Legile lui Newton

2. *Spațiu și timp: substanțe sau relații?*
   - 2.1. Spațiu, timp și mișcare absolute în fizica newtoniană
   - 2.2. Relaționalismul lui Leibniz
   - 2.3. Relaționalismul și teoria fizică

3. *Ontologie primitivă și structură dinamică*
   - 3.1. De la ontologia primitivă la structura dinamică
   - 3.2. De la structura dinamică la probabilități
   - 3.3. Structura dinamică inclusă în ontologie
   - 3.4. Metafizica humeană

4. *De la mecanica clasică la fizica relativistă*
   - 4.1. Electrodinamică
   - 4.2. Câmpurile aparțin ontologiei?
   - 4.3. Teoria relativității speciale

5. *Teoria relativității generale*
   - 5.1. Gravitația ca acțiune locală
   - 5.2. Substantialism metric

6.3. Fizica relativistă și metafizica timpului
6.4. Blocul Fizica și metafizica universului
6.5. Relaționalismul leibnizian în fizica relativistă

7. *Nonlocalitate cuantică*
7.1. Experimentul mental al lui Einstein din 1927
7.2. Argumentul din 1935 al lui Einstein, Podolsky și Rosen
7.3. Teorema lui Bell din 1964

8. *Funcția de undă cuantică și problema măsurării*
8.1. Principiile separabilității și acțiunii locale
8.2. Problema măsurării
8.3. Decoerență
8.4. Prăbușirea funcției de undă

9. *Fizica cuantică ca teorie a naturii*
9.1. Teoria lumilor multiple
9.2. Teoria GRW: Versiunea lui Ghirardi
9.3. Teoria GRW: versiunea lui Bell

10. *Fizica cuantică și fizica clasică*
10.1. Mecanica bohmiană
10.2. Holismul cuantic
10.3. Statutul ontologic al funcției de undă
10.4. Statutul ontologic al probabilităților

11. *Fizica cuantică și fizica relativistă*
11.1. Teoria cuantică a câmpurilor
11.2. Nonlocalitate cuantică și fizică relativistă
11.3. Direcția timpului
11.4. Gravitația cuantică

12. *Limitele științelor naturii*
12.1. Explicația fenomenelor
12.2. Determinism fizic și determinism metafizic
12.3. Reducerea funcțională și limitele acesteia

Bibliografie

Index analitic

PREFAȚĂ *de Mauro Dorato*

Textul pe care urmează să îl citiți este o ilustrare strălucită, dar succintă, a modului în care reflecția filosofică asupra structurii fundamentale a realității nu poate ignora fizica și cum, dimpotrivă, fizica nu se poate lipsi de filosofie pentru a-și clarifica cu precizie ontologia - adică pentru a înțelege clar ce ne spune despre lume. Astăzi, această indisolubilitate nu implică coincidența celor două discipline, așa cum era cazul pe vremea presocraticilor, a lui Aristotel și chiar a lui Newton, a cărui lucrare fundamentală a fost intitulată *Principiile matematice ale filosofiei naturale.* În ciuda matematizării din ce în ce mai pronunțate a fizicii teoretice, care, încă din vremea lui Newton și Leibniz, pare să o distanțeze tot mai mult de investigațiile mai conceptuale tipice filosofilor, fizicienii contemporani sunt din ce în ce mai convinși că probleme precum măsurarea și nonlocalitatea în mecanica cuantică, statutul ontologic al spațiu-timpului, ontologia mecanicii cuantice nerelativiste și relativiste și natura legilor naturale - toate acestea fiind abordate în acest text cu o claritate admirabilă - joacă un rol important în dezvoltarea disciplinei lor. Însuși laureat al Premiului Nobel, Steven Weinberg, care până acum câțiva ani era sceptic, dacă nu chiar sarcastic, față de oricine încerca să rezolve problema caracterului precis al observațiilor noastre asupra lumii macroscopice pe baza indefinității cuantice, recunoaște acum că problema este serioasă și inevitabilă și nu poate fi rezolvată cu sfatul obișnuit de „taci și calculează", ca și cum fizica ar fi redusă la simple rețete de calcul și operații de laborator. Calculele și experimentele sunt indispensabile, dar sunt „doar" instrumente pentru a atinge adevăratul și ultimul scop al fizicii și al științelor naturii în general, acela de a înțelege lumea și locul nostru în ea. Și mulți fizicieni lucrează astăzi la încercarea de a unifica relativitatea și mecanica cuantică (sarcina fizicii în acest secol).

„începând” de la primul și nu de la al doilea, ei cred că acest lucru necesită contribuția filosofilor.

În mod firesc, o interacțiune fructuoasă între fizicieni și filosofi presupune ca ambii să citească reciproc lucrările. Această colaborare este facilitată acum de faptul că cei mai buni filosofi contemporani ai fizicii sunt, spre deosebire de trecut, pricepuți din punct de vedere tehnic și, la fel ca autorul acestei cărți, capabili să citească formule matematice și să le înțeleagă sensul. Din această perspectivă, paradoxal, tocmai datorită acestei înțelegeri, potrivit lui Esfeld, este posibil să se avanseze teza care servește drept *laitmotiv* pentru întregul text: adică nu se poate înțelege naiv ontologia teoriilor fizice pornind doar de la modelele lor matematice, deoarece *„ontologia necesită întotdeauna o reflecție filosofică* precum cea dezvoltată de Leibniz și adresată lui Newton” *(vezi mai jos,* p. 32). Firește, textele principale ale lui Newton conțin argumente conceptuale implicite sau explicite și, chiar din motivul explicat mai sus, ele însele sunt, într-un sens mai puțin direct, filosofice și ontologice: cel puțin într-o interpretare a filosofiei spațiului a lui Newton, spațiul absolut trebuie presupus pentru a explica efectele inerțiale. Un posibil dezacord cu unele teze filosofice controversate apărate în text — cum ar fi cele privind natura ontologic secundară a câmpurilor în raport cu particulele — nu diminuează originalitatea tezelor propuse, forța argumentelor cu care acestea sunt apărate și nici faptul că lectura textului, având în vedere cunoașterea foarte aprofundată a literaturii pe care o dezvăluie, este de o importanță enormă pentru dobândirea unei imagini de ansamblu actualizate asupra filosofiei fizicii contemporane.

PREFAȚĂ A AUTORULUI

Filosofia sau ontologia naturii este la fel de veche ca filosofia însăși, având originile sale până la primii filozofi ionieni presocratici. A fost întotdeauna legată de investigarea științifică a naturii și ar trebui să rămână așa și astăzi: știința și filosofia, de fapt, au un scop comun: înțelegerea naturii. Scopul acestei lucrări este de a oferi o imagine de ansamblu asupra filosofiei contemporane a naturii. Cartea începe cu filosofia naturală a lui Newton, apoi analizează teoria câmpurilor împreună cu fizica relativității și, în final, cel mai important, fizica cuantică. Modul în care sunt tratate subiectele dezvăluie clar perspectiva autorului și, prin urmare, acesta speră să provoace reflecție în cititor. În plus, cartea nu presupune cunoștințe tehnice de fizică și se bazează pe a doua parte a lucrării mele anterioare, *Philosophie des Sciences. Une introduction* [1]. Le sunt foarte recunoscător lui Tiziano Ferrando, Andrea Oldofredi și Olga Sarno, care nu numai că mi-au tradus textul în italiană, dar au și îmbunătățit prezentarea materialului. Aș dori, de asemenea, să-i exprim recunoștința lui Emilio Corriero pentru amabila sa invitație de a publica o carte despre filosofia naturală contemporană în seria „Physis".

1Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2017 [3], traducere prin amabilitatea editurii.

1. ATOMISMUL CLASIC

1.1. *Ce este metafizica naturii?*

Filosofia științei este împărțită în două părți: epistemologia științei și metafizica naturii. Prima se ocupă de justificarea teoriilor noastre științifice, în timp ce a doua - numită și „filosofia naturii" - își propune să propună o viziune filosofică asupra naturii în ansamblu, bazată pe cunoștințele furnizate de știință.

Încă din Grecia antică, filosofia naturală a fost în centrul gândirii occidentale, fiind, mai presus de toate, o reflecție asupra existenței. Primii gânditori, precum Thales (cca. 640 î.Hr.), Anaximandru (cca. 611–549 î.Hr.) și Anaximene (a doua jumătate a secolului al VI-lea î.Hr.), sunt cunoscuți drept „filosofi ai naturii" tocmai datorită ideilor lor inovatoare (adică, care nu mai depind de conceptul de divin) despre ființa lucrurilor. Din reflecțiile lor au apărut atât științele naturale, cât și filosofia, care, de fapt, au rămas inseparabile de la originile lor până în zilele noastre.

Conceptul nostru de „natură" derivă din conceptul grecesc de *physis,* care la rândul său provine din verbul *phyein* , care poate fi tradus prin „a fi generat, a crește". Conform primei sistematizări filosofice a naturii, *Fizica* lui Aristotel (384-322 î.Hr.), *physis* este domeniul „lucrului în sine", înțeles ca ceea ce conține atât principiul schimbării, cât și continuarea existenței sale. *Physis- ul* unui lucru este ceea ce îi permite să existe independent de altele. Astfel, vedem cum converg cele două sensuri existente ale cuvântului „natură": natura ca esență a unui lucru, dar și ca mulțime de lucruri care există independent unele de altele. În consecință, Aristotel nu contrastează domeniul naturii cu cel al minții, ci mai degrabă cu cel al tehnologiei, înțeleasă ca domeniul lucrurilor care își găsesc originea în acțiunea umană. (Vezi în special: *Fizică,* cartea a 2-a, capitolul 1). Mintea — considerată ca fiind ceea ce este disponibil unei ființe înzestrate cu percepții, emoții, dorințe, credințe și intenții — există autonom și, prin urmare, aparține naturii.

În acest sens, Stagiritul deschide tratatul care a ajuns până la noi sub numele de *Metafizică* , argumentând că toate ființele umane aspiră la

cunoaștere (Cartea 1, Capitolul 1), care își are originea în percepțiile senzoriale ale unor evenimente particulare. Aceste percepții duc la formarea memoriei, înțeleasă ca memorarea unor secvențe de evenimente particulare, cum ar fi, de exemplu, succesiunea zilei și a nopții sau anotimpurile (primăvara, vara, toamna, iarna). Memoria acestor lucruri constituie experiență *(empeiria* în greacă); este cunoașterea faptelor, adică a ceea ce se întâmplă în lume, dar nu răspunde la întrebarea *de ce* apar aceste fapte. Dacă se încearcă răspunsul la această întrebare, se trece de la domeniul experienței la cel al științei *(episteme* în greacă): aceasta din urmă nu se limitează la simpla observare a faptelor, ci caută să le explice prin formularea unor propoziții care au valoare universală, adică legi ale naturii. Legea generală a gravitației, de exemplu, explică atât succesiunea anotimpurilor, cât și cea a zilei și a nopții.

După știința naturii (fizica) vine metafizica; aceasta se ocupă de ființa qua ființă, căutând să dezvăluie trăsăturile caracteristice ale tot ceea ce există (vezi *Metafizica,* cartea a IV-a). Mai mult, pentru Aristotel, metafizica nu se preocupă de obiecte despre care se presupune că există dincolo de natură - adică, metafizica nu trebuie confundată cu teologia. Prima, de fapt, studiază aceeași materie ca și fizica, și anume, natura înțeleasă ca ansamblul obiectelor care există în lume independent de noi, dar la un nivel mai general și fundamental; nu se preocupă, de fapt, de obiecte particulare (cum ar fi stelele, corpurile solide sau studiul constituenților microfizici ai materiei), ci de ceea ce le caracterizează pe toate; cu toate acestea, există o continuitate între fizică și metafizică - într-adevăr, s-ar putea spune chiar că sunt inseparabile.

Filosofia a fost inițial legată de științe, iar acestea din urmă, în special în epoca modernă, s-au dezvoltat tocmai din acestea. Într-adevăr, majoritatea marilor filozofi ai tradiției noastre, precum Platon, Aristotel, Descartes și Leibniz (printre alții), au fost și mari oameni de știință. Este imposibil, de exemplu, să separăm filosofia de fizică în operele lui Descartes sau Leibniz, așa cum nu există niciun motiv să nu-i numărăm pe Newton și Einstein printre marii filozofi ai epocilor lor respective. Abia din secolele al XIX-lea și al XX-lea a avut loc o separare între știință și filosofie, iar aceasta s-a produs în detrimentul amândurora. Această dezintegrare a dus la faptul că fizicienii, chiar și cei eminenți, lipsiți de rigoarea conceptuală oferită de filosofie, propunând interpretări obscure ale diferitelor teorii științifice, așa cum s-a întâmplat în special în domeniul fundamentelor mecanicii cuantice.

În mod similar, mulți gânditori fără pregătire științifică au proclamat moartea metafizicii, fără a-i înțelege problemele reale. Ar fi o pierdere de timp să încercăm să discutăm aici astfel de afirmații și interpretări. Scopul este mai degrabă de a le respinge printr-o metafizică presocratică, sau așa cum a fost concepută de Platon, Aristotel, Descartes, Leibniz, Newton sau

Einstein. Adică, încercând să demonstrăm, în această investigație, trăsăturile fundamentale ale ființei, fără a face nicio distincție între fizică și metafizică, între știință și filosofie.

O astfel de separare ar fi regretabilă, deoarece, așa cum am menționat deja, există o continuitate istorică între cele două. Dacă deținem cunoștințe despre lume, acest lucru se datorează științelor, deoarece acestea sunt, alături de filozofie, singura activitate umană capabilă să evalueze pretențiile noastre de cunoaștere pe baza unor argumente. În același timp, științele nu s-ar putea lipsi de filosofie, deoarece fiecare teorie științifică necesită interpretare, iar pentru a o dezvolta sunt necesare concepte și categorii filozofice; în plus, trebuie să se țină cont de criteriile filozofice dezvoltate pentru a evalua diferite interpretări ale aceleiași teorii. Mulți mari oameni de știință (precum Newton, Einstein, Bohr și Heisenberg) au manifestat un mare interes pentru filosofie, iar o mare parte din cercetarea științifică are la bază motivații filozofice; de exemplu, cercetarea cosmologică care vizează înțelegerea etapelor timpurii ale universului și a naturii timpului sau cercetarea actuală în neuroștiințe care vizează înțelegerea esenței și naturii minții.

Având în vedere istoria recentă a filosofiei, astăzi putem dezvolta teorii filosofice despre lume doar dacă luăm în considerare descoperirile științifice și, prin intermediul lor, ne angajăm într-o reflecție critică asupra științelor - și pe această bază, apoi elaborăm și evaluăm riguros răspunsurile la marile întrebări filosofice referitoare la realitate. În acest sens, filosofia naturii este metafizica unui domeniu specific, dar central: natura. În măsura în care filosofia naturii depinde de științe, viziunea asupra lumii naturale propusă de metafizică nu poate fi mai sigură decât cea oferită de cunoașterea științifică . Prin urmare, dacă are loc o revoluție conceptuală în domeniul științific, este posibil ca și metafizica naturii să fie necesară modificarea în consecință.

Începând cu anii 1970, metafizica a cunoscut o renaștere , însă rămâne în mare parte deconectată de știință. Filosofia științei din ultimele patru decenii, pe de altă parte, a depășit empirismul doctrinar care limitează sfera filosofiei la analiza logică a teoriilor științifice. Cu toate acestea, chiar și astăzi, încercările de a propune o viziune filosofică asupra naturii sunt rare. Este păcat. Locul care ar trebui ocupat de metafizica naturii este lăsat speculațiilor oamenilor de știință, adesea lipsiți de rigoare argumentativă, sau, mai rău, amatorilor care popularizează descoperirile științifice pentru a deduce consecințe ideologice în propriul beneficiu (o *Weltanschauung)* fără nicio valoare argumentativă. În acest context, scopul acestei cărți este de a prezenta un proiect pentru o metafizică a naturii, axată în întregime pe fizica fundamentală, și de a face un bilanț al stării sale actuale.

1.2. *Ideea de atomism*

Atât fizica, cât și metafizica caută, într-un efort comun, să formuleze un răspuns la următoarele întrebări:

1. Ce este materia? Ce sunt spațiul și timpul?
2. Care sunt legile naturii?
3. Cum explicăm fenomenele observabile prin legile naturii cărora le respectă materia în spațiu și timp?

Aceste întrebări sunt atât științifice, cât și filozofice. Ele privesc ființa materiei, a spațiului și a timpului, precum și legile și forma concretă pe care o ia această ființă, permițându-ne astfel să înțelegem acele aspecte ale lumii care ne sunt familiare.

Principala paradigmă din fizica modernă și filosofia naturală care oferă un răspuns la aceste întrebări este atomismul; acesta își are originile în filosofia greacă, cu gânditorii presocratici Leucip (cca. 440–370 î.Hr.) și Democrit (cca. 460–370 î.Hr.), care au susținut ideea că:

> [...] în vid se mișcă într-o ordine împrăștiată o pluralitate infinită de substanțe indivizibile și nediferențiate, precum și lipsite de calități și afecțiuni. Când se apropie, întâlnindu-se sau împletindu-se, apar aceste agregate, dintre care unul se numește apă, al doilea foc, al treilea plante, celălalt oameni (fragmentul 179, DK 68 A 57).

Isaac Newton (1642-1727) scrie în mod similar la sfârșitul tratatului său de *optică* din 1704 (cartea 3, întrebarea 31):

> Mi se pare probabil că Dumnezeu, la începutul lumii, a format materia din particule solide, compacte, dure, impermeabile și mobile [...]; pentru ca natura să dureze, schimbările obiectelor corporale trebuie să constea doar în diversele despărțiri, reuniuni și mișcări ale acestor particule permanente (1978, pp. 600-601).

Atractivitatea atomismului reiese clar din aceste citate: pe de o parte, prezintă o propunere pentru o ontologie a lumii naturale cât mai parcimonioasă și generală posibil; pe de altă parte, oferă o explicație clară și ușor de înțeles a domeniului experienței noastre. Obiectele macroscopice sunt compuse din particule microscopice indivizibile, iar toate diferențele dintre ele - la un anumit moment și, prin urmare, în timp - sunt explicate prin modul în care aceste particule sunt distribuite în spațiu și prin modul în care configurația lor se schimbă în timp, adică prin mișcarea lor. Din aceste motive, în timpurile contemporane, fizicianul Richard Feynman (1918-1988) a afirmat că:

> „[D]acă într-un cataclism toate cunoștințele științifice s-ar pierde și o singură propoziție ar putea fi transmisă generațiilor succesive , ce afirmație ar conține cele mai multe informații în cele mai puține cuvinte? Cred că este *ipoteza atomică* (sau *faptul atomic* , dacă preferați) că *toate lucrurile sunt alcătuite din atomi, particule mici aflate în mișcare perpetuă care se atrag reciproc la distanțe scurte, dar se resping reciproc atunci când sunt presate una de cealaltă.* În această singură

propoziție, după cum vom vedea, există o cantitate enormă de informații despre cum este alcătuită lumea; tot ce este nevoie este puțină imaginație și raționament" (2000, p. 25).

Totuși, enorma cantitate de informații despre lume conținută în ipoteza atomică nu constă doar în teza că apa, focul, o plantă și așa mai departe sunt compuse din aceiași atomi aranjați diferit, ci derivă și din legile care guvernează mișcarea lor, explicând stabilitatea obiectelor macroscopice și comportamentul lor. Prin urmare, atomismul, în timpurile străvechi, a rămas o poziție speculativă, lipsită de o formulare a unor legi precise și generale ale mișcării atomice. Newton, pe de altă parte, a transformat atomismul într-o teorie fizică, propunând astfel de legi care conduc la predicții ce pot fi testate prin experimente. Astfel, proiectul de a oferi o explicație a *tot ceea ce există* în lumea naturală în termeni de mișcare a atomilor a fost realizat. Să luăm, așadar, în considerare legile propuse de Newton.

1.3. *Legile lui Newton*

În capodopera sa, *Principiile matematice ale filosofiei naturale* (1687), Newton își construiește teoria distingând o anumită formă de mișcare a obiectelor, și anume mișcarea rectilinie uniformă (adică fără schimbare de viteză); aceasta este definită ca fiind *inerțială.* El formulează prima lege a mecanicii în acești termeni:

Fiecare corp persistă în starea sa de repaus sau mișcare rectilinie uniformă, cu excepția cazului în care este forțat să își schimbe această stare de către forțe imprimate (1989, p. 113).

Aceasta nu înseamnă că situațiile de mișcare inerțială nu pot fi explicate . Fiecare caz particular de mișcare rectilinie uniformă este explicat prin pozițiile și vitezele inițiale ale obiectului în cauză, combinate cu legea mișcării, care impune ca aceasta să rămână constantă. Identificarea unei anumite forme de mișcare ca mișcare inerțială îi permite lui Newton să definească toate celelalte forme de mișcare în termeni de abatere de la aceasta sub influența forțelor. A doua lege a lui Newton, de fapt, poate fi formulată după cum urmează:

Schimbarea mișcării este proporțională cu forța motrice aplicată și are loc de-a lungul liniei drepte de-a lungul căreia a fost aplicată forța (ibid., p. 114).

În cele din urmă, Newton stipulează o a treia lege care afirmă că acțiunea unei forțe asupra unui corp corespunde unei reacții echivalente a corpului însuși:

Pentru fiecare acțiune există o reacțiune egală și opusă: adică acțiunile a două corpuri sunt întotdeauna egale între ele și îndreptate spre direcții opuse (ibid., p. 115).

Aceste legi sunt universale: se aplică atât mișcării corpurilor cerești (astronomie), cât și mișcării corpurilor terestre (mecanica propriu-zisă). Cu toate acestea, ele sunt insuficiente nici pentru a deduce predicții, nici pentru a oferi explicații ale mișcărilor reale: pentru aceasta, de fapt, trebuie determinate forțele care acționează. Cu alte cuvinte, aceste legi constituie un cadru care trebuie completat de fiecare dată prin specificarea forțelor care acționează într-o situație fizică dată. Acum, singura lege pe care Newton o elaborează în acest cadru este cea a gravitației, atracția universală dintre corpuri. În acest fel, el pune în practică ideea de a exprima mișcările, atât celeste, cât și terestre, într-o singură formulă capabilă să le descrie pe toate.

Pentru ca o forță în general – și în mod specific forța gravitațională – să influențeze mișcarea particulelor, Newton le atribuie un parametru care denotă masa: pe de o parte, masa inerțială (rezistența la accelerație), iar pe

de altă parte, masa gravitațională (care face posibilă interacțiunea gravitațională). Valoarea acestor diferite forme de masă rămâne constantă. Să luăm acum în considerare un univers care conține N particule având pozițiile q_1t, q_2t, ..., q_nt GR_3 în spațiul euclidian tridimensional la *un* moment *t* GR . A *doua* lege a lui *Newton* , formulată în limbajul ecuațiilor diferențiale utilizate în fizica contemporană, poate fi scrisă indicând schimbarea vitezei particulei la momentul *t* sub influența forțelor care acționează asupra poziției sale:

$$= rMi.t \qquad (1.1)$$

În această formulă, *m* _i indică masa, *q* _i indică accelerația (derivata a doua a poziției) a particulei *q* _i la momentul *t* , *F* _i forța care acționează asupra *q* _i la momentul *t* , *q* ₁, ..., *q* _N pozițiile și *q* ₁ , ..., *q* _N vitezele (derivata prima a poziției) ale tuturor particulelor din universul nostru.

În acest context, legea gravitației poate fi formulată în continuare după

$$= 5? \underset{j/i}{} Gmjmj$$

cum urmează:

$$\frac{Qj.t - <lj.t}{Iki.t —} \qquad (1.2)$$

unde *G* este constanta gravitațională. Legea gravitației depinde doar de pozițiile particulelor la momentul *t și de* masele lor . Dacă luăm în considerare (1.1) și (1.2), putem deduce foarte ușor eliminarea termenului *F* care indică forța:

$$= 12 \; Gm\,i\frac{Qj.t\;Qj.t}{lk<,t - Qj.tll^3,} \qquad (1.3)$$

Pare așadar legitim să ne întrebăm dacă există forțe în natură: dacă pozițiile tuturor particulelor din universul nostru la un moment dat *t* , masele lor și constanta gravitațională *G sunt date* , accelerația gravitațională a particulelor la *t* este fixă. Din aceasta putem deduce că gravitația este o formă

de interacțiune universală care are loc instantaneu; de fapt, deși este calculată pentru perechi de particule, atracția gravitațională experimentată de o particulă la momentul *t* depinde simultan și strict de pozițiile și masele *tuturor* celorlalte particule din univers (1.2). Fiind instantanee, această interacțiune nu poate fi transmisă de o forță sau de un *mediu,* un mecanism de propagare în spațiu, deși depinde de distanțele (mai precis de pătratul distanțelor) dintre particule. După cum subliniază filosoful contemporan Bas van Fraassen într-un alt context, ideea unei propagări instantanee prin spațiu se dovedește a fi foarte dificil de susținut:

> A vorbi despre o mișcare instantanee de la *X* la *Y* este o metaforă confuză sau incoerentă, deoarece entitatea în cauză ar trebui să se afle simultan la *X* și la *F.* Dar în acest caz nu este nevoie de nicio mișcare, deoarece este deja la destinație (1991, p. 351).

În acest sens, nici măcar Newton însuși nu a fost mulțumit de această implicație (că din teoria newtoniană se poate deduce, în consecință, că gravitația este o interacțiune instantanee), iar într-o scrisoare celebră el scrie într-adevăr:

> Faptul că gravitația ar trebui să fie înnăscută, inerentă și esențială materiei, astfel încât un corp să poată acționa asupra altuia la distanță, prin vid, fără mijlocirea a nimic altceva, deoarece și prin care acțiunea și forța lor să poată fi transmise de la unul la altul, este pentru mine o asemenea absurditate, încât cred că niciun om care are o facultate competentă de a gândi în chestiuni filosofice nu poate cădea vreodată în ea [2].

Studiul interacțiunii dintre particule și al modului în care aceasta se produce face obiectul unei intense dezbateri fizice și filosofice la care vom reveni în capitolele următoare.

2. SPAȚIU ȘI TIMP: SUBSTANȚE SAU RELAȚII?

2.1. *Spațiu, timp și mișcare absolute în fizica newtoniană*

Prima lege a lui Newton definește clar mișcarea inerțială ca mișcare uniformă în linie dreaptă în raport cu spațiul. În al doilea rând, el concepe

2 Scrisoarea lui Newton către Bentley, 25 februarie 1692/3 (în Newton, 2010).

particulele ca obiecte care se mișcă într-un spațiu și timp absolut; în contextul teoriei newtoniene, termenul „absolut" denotă posibilitatea ca spațiul și timpul să existe independent de prezența materiei. În lucrarea sa *„Principii matematice ale filosofiei naturale",* Newton caracterizează spațiul și timpul după cum urmează:

> I. Timpul absolut, adevărat, matematic, în sine și prin natura sa fără relație cu nimic exterior, curge uniform și, sub alt nume, se numește durată [...]. II. Spațiul absolut, prin natura sa fără relație cu nimic exterior, rămâne întotdeauna același și imobil (1989, pp. 101-102).

În dezbaterea contemporană, această poziție este numită *substanțialistă* în ceea ce privește spațiul și timpul: acestea sunt, de fapt, considerate substanțe. Prin urmare, materia constă din particule localizate în spațiu care își schimbă poziția în timp.

Totuși, mișcarea și repausul măsurate sunt concepte relative în mecanica newtoniană: atunci când se măsoară mișcarea, o particulă se află în mișcare rectilinie sau în repaus doar în raport cu alte particule. Prin urmare, este întotdeauna necesar să se indice cadrul de referință față de care particula în cauză se află în mișcare rectilinie sau în repaus. *Cadrul de referință inerțial* poate fi orice sistem de particule care nu este supus niciunei forțe, care se află, prin urmare, într-o stare de mișcare rectilinie uniformă. Este important de reținut că legile fizicii sunt aceleași, indiferent de cadrul de referință ales; cu alte cuvinte, toate cadrele de referință sunt echivalente pentru descrierea fenomenelor fizice. În acest context, pentru a trece de la un sistem de referință inerțial la altul care se află, de asemenea, într-o stare de mișcare rectilinie uniformă, trebuie să se aplice așa-numitele *transformări galileene, numite* după Galileo Galilei. Dacă trecem de la un sistem de referință inerțial *I* la un sistem de referință inerțial *I' în* direcția *x* în mișcare rectilinie uniformă față de primul, putem scrie aceste transformări în felul următor (*x* , *y, z* indică cele trei coordonate spațiale, *t* timpul și *v* viteza):

./■' I' ri, il' i/. ' *r I* (2 |i

În acest fel, o particulă poate fi simultan în repaus față de un sistem de referință și în mișcare rectilinie uniformă față de un altul. Pentru a ilustra acest punct cu un exemplu, imaginați-vă că sunteți într-un tren care se deplasează de la Milano la Genova: trenul circulă cu o viteză de 120 km/h dacă alegem stația ca sistem de referință, dar este în repaus dacă luăm în considerare o mașină care circulă în aceeași direcție ca trenul și cu aceeași viteză ca trenul.

Totuși, Newton susține că în cazul mișcării de rotație (spre deosebire de mișcarea rectilinie) se poate observa empiric o mișcare în raport cu spațiul absolut, adică o mișcare care nu este relativă la un sistem de referință dat. În

Principii (scholium de definiții) el propune un experiment mental, cunoscut astăzi sub numele de „experimentul găleții", pe care îl putem împărți în trei faze: (|) să luăm în considerare o găleată plină cu apă, a cărei suprafață rămâne plană și în care atât găleata, cât și apa sunt în repaus; (2) să rotim găleata, considerând că în această fază apa este încă în repaus, iar suprafața acesteia rămâne plană; (3) găleata și apa se rotesc cu aceeași viteză, iar *suprafața acesteia din urmă este concavă* - apa începe să se ridice pe marginile găleții. Newton susține că diferența dintre (1) și (3) nu poate fi înțeleasă în termeni de mișcare relativă a apei în raport cu găleata, prin urmare (3) ar arăta mișcarea absolută (accelerația absolută) a apei în spațiul absolut.

Întrucât admite existența unui spațiu absolut, este de conceput în teoria sa că întreaga configurație a materiei din univers se rotește în spațiul absolut sau chiar se mișcă în acesta într-o manieră rectilinie. Și tocmai această ultimă posibilitate provoacă faimoasa reacție a lui Leibniz.

2.2. *Relația lui Leibniz*

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) și-a dezvoltat critica la adresa lui Newton în corespondența sa cu Samuel Clarke (1675–1729), care a acționat ca adjunct al lui Newton (Leibniz, 2000, pp. 487–556). Leibniz a argumentat împotriva ipotezei existenței unui spațiu și timp absolut, distincte de materie, după cum urmează: deoarece spațiul și timpul sunt omogene, adică deoarece diferite puncte sau regiuni ale spațiului și timpului sunt echivalente, lui Dumnezeu îi lipsește o *rațiune suficientă* pentru a crea materia în anumite puncte (sau regiuni) ale spațiului și timpului și nu în altele. De asemenea, este posibil să se reformuleze acest argument fără a recurge la controversatul principiu al rațiunii suficiente și la invocarea lui Dumnezeu: dacă există un spațiu și un timp absolut, distincte de materie, atunci există diferite aranjamente posibile pentru întreaga configurație a materiei în univers în cadrul lor. Toate relațiile dintre particule rămân aceleași pentru toate aceste posibilități diferite, care diferă unele de altele doar pentru că sunt localizate în puncte diferite ale spațiului absolut. De exemplu, în cazul unei rotații de 180 de grade a materiei în ansamblu, relațiile dintre particule rămân neschimbate: se schimbă doar punctele din spațiul absolut în care sunt localizate particulele . Prin urmare, Leibniz concluzionează că nu există o diferență reală între aceste distribuții: este întotdeauna aceeași situație fizică (a treia lucrare, §§ 5 și 6; a patra lucrare, § 15). Acest raționament se bazează pe celebrul *principiu al identității indiscernabilelor* postulat de Leibniz.

Concluzia generală a argumentului împotriva spațiului și timpului absolut este că acestea constituie un *surplus de structură,* extinzându-se dincolo de configurația materiei universului (și deschizând astfel, în mecanica

newtoniană, posibilitatea unor diferite plasări ale acestei configurații în cadrul lor). Cu alte cuvinte, conceperea spațiului și timpului ca substanțe contrazice principiul parcimoniei ontologice pe care se bazează atomismul. Conform lui Leibniz, există doar relații spațiale între particule și schimbarea acestor relații: spațiul este ordinea entităților coexistente, în timp ce timpul este ordinea succesiunilor (al treilea eseu, § 4; al patrulea eseu, § 41 și PS; al cincilea eseu, §§ 31, 47).

Astfel, pe baza relaționalismului lui Leibniz, putem formula atomismul ca o ontologie parcimonioasă a naturii, admițând doar următoarele două axiome [3]:

1. *Există relații de distanță care identifică puncte ale materiei (particulele* .
2. *Punctele de materie (particulele) sunt permanente, în timp ce relațiile de distanță pe care le mențin se schimbă.*

Particulele se disting unele de altele prin poziția lor . Chiar dacă am concepe masa ca o proprietate intrinsecă, inerentă particulelor, acest lucru nu ar fi suficient pentru a le distinge, deoarece toate particulele aceleiași specii au aceeași valoare a masei. În cazul relaționalismului, relațiile nu numai că pot distinge particulele unele de altele, ci pot funcționa și ca un principiu de individuare și, prin urmare, le pot individua: ceea ce le caracterizează ca obiecte materiale este faptul că mențin relații de distanță între ele, astfel încât fiecare particulă se distinge de toate celelalte prin poziția sa în rețeaua de relații de distanță.

Relaționalismul respectă astfel principiul lui Leibniz al identității indiscernabilelor. Mai mult, preia caracterizarea cartesiană a materiei ca *res extensa,* o caracterizare care ia în considerare doar extensia [4]: relațiile de distanță sunt motivul pentru care punctele conectate între ele sunt puncte ale materiei (particule), spre deosebire, de exemplu, de punctele mentale carteziene, care sunt conectate între ele prin relații de gândire. Cu alte cuvinte, dacă stabilim conexiuni între puncte cu relații de extensie (distanțe), obținem puncte materiale (particule); dacă conectăm puncte cu relații de gândire, obținem substanțe mentale carteziene etc.

Prin urmare, aceasta este o individuare structurală a obiectelor: obiectele sunt caracterizate în întregime prin relațiile lor și nu prin proprietăți intrinseci sau un substrat material primitiv. Dacă, așadar, relaționalismul propune o individuare a obiectelor prin relații, atunci se alătură în mod firesc curentului cunoscut astăzi sub numele de *realism structural ontic.* Acest curent rupe cu tradiția aristotelică, nerecunoscând o esență intrinsecă obiectelor (o formă), ci doar relațiilor. Cu alte cuvinte, obiectele sunt doar noduri într-o rețea de

3Vezi Esfeld și Deckert, 2017, cap. 2.1.
4Vezi Descartes, *Principiile filosofiei ,* partea a doua, § 4.

relații [5]. În consecință, o pluralitate de obiecte materiale nu este presupusă ca dată; mai degrabă, relațiile de distanță sunt cele care constituie aceste pluralități, funcționând ca principii de individuare a obiectelor fizice. Particulele sunt, așadar, impenetrabile în virtutea relațiilor de distanță care există între ele: pentru ca una să pătrundă în cealaltă, nu ar trebui să existe nicio distanță între ele, dar în acest caz nu ar exista două particule.

Pentru a defini în ce constă o relație de distanță, trebuie să alegem o reprezentare. Să luăm în considerare un univers format dintr-un număr finit de *N* și N particule. Admiterea unui număr finit de particule este suficientă pentru corectitudinea empirică a teoriei și facilitează discuția noastră. Mulțimea fi a tuturor configurațiilor posibile ale relațiilor de distanță dintre aceste *N* și N particule poate fi reprezentată în felul următor. Fie $M = \{1, 2, ..., N\}$ și $\& = \{(i, j)\ I\ i, j\ \mathbf{M}, i\ A\ j\}$ mulțimi care denotă respectiv numărul de particule în cauză și perechi formate din particule distincte (neidentice). Mulțimea *Q* conține elementele **il = (A** $_{ij}$ **)** $_{(ij)\ \&}$, care pot fi reprezentate prin atribuții numerice care îndeplinesc următoarele cerințe:

1. **=(A** $_{ij}$ **)** $_{(i;\ j)\ \&}$ este un $N(N - 1)$-uplu de valori pozitive **A** $_{ij}$ G R' pentru fiecare (i, j) G $\&$;
2. Pentru fiecare (i, j) G $\&$, este **A** $_{ij}$ **= A** $_{ij}$;
3. Pentru fiecare *i* , *j, k* G **M** , vale **A** $_{ij}$ **< A** $_{ik}$ **+ A** $_{kj}$;
4. Pentru fiecare *i* , *j* GM, dacă *i* A *j,* atunci { A $_{ik}$ I *k* GM, *k* A *i* } A { A ■ $_{kj}$ I *k* G **M** , *k* A *j* }.

Cerințele (1) și (2) stipulează matematic că relația de distanță este reflexivă, simetrică și conexă (adică, că toate particulele dintr-o configurație dată sunt conectate între ele). Cerința (3) este inegalitatea triunghiulară, în virtutea căreia relația în cauză este o relație de distanță. În cele din urmă, cerința (4) stipulează că relațiile de distanță individuează particulele prin distingerea lor una de cealaltă: dacă particula *i* nu este identică cu particula *j* , atunci mulțimea care grupează toate relațiile de distanță pe care *i* le are față de alte particule dintr-o configurație se distinge prin cel puțin una dintre relațiile sale de mulțimea care grupează toate relațiile de distanță pe care *j* le are față de alte particule.

Exemplu de configurație posibilă a particulelor

5 Vezi în special Ladyman, 1998, 2007; Ladyman și Ross, 2007, cap. 2-3; Esfeld și Lam, 2008 și 2011; French, 2014, cap. 5-7.

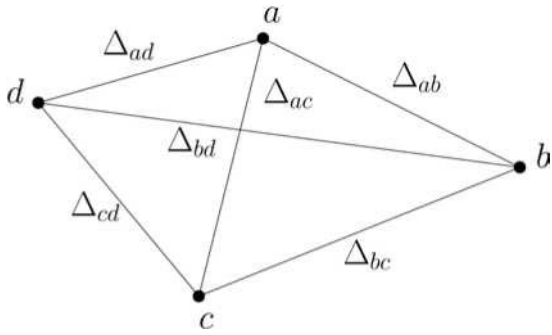


Fig. 2.1 - O configurație formată din $N = 4$ particule.

Aplicând prima axiomă, avem că mulțimea A, formată din toate distanțele dintre perechile de particule, conține următoarele șase elemente:

$$\mathbf{Q} = \{\mathbf{A}_{ab}, \mathbf{A}, \mathbf{Ad}, \mathbf{Ab}, \mathbf{Abd}, \mathbf{Ad}_{j}\}$$

Prin urmare, cardinalitatea sa este $|\mathbf{Q}| = 6$, deoarece $N(N-1) - (4-1) = 6$ sunt perechile în cauză.

Structura internă a lui **Q** este determinată de a doua axiomă: pentru fiecare pereche de particule *i, j,* identitatea $\mathbf{A}_{ij} = A$ - *i este valabilă*. Din Fig. 2.1 rezultă, de exemplu, că $\mathbf{A}_{ab} = \mathbf{A}_{ba}$.

Din nou, din Fig. 2.1 se poate observa că, indiferent de alegerea a trei puncte *(a, b, c*), *(a, b, d), (a, c, d)* sau *(d, c, b),* inegalitatea triunghiulară este valabilă; de exemplu, luând în considerare triunghiul cu vârfuri (*a* , *b* , *c*) și laturi (A_{ab}, A_{ac}, A_{bc}), relația $A_{ab} < A_{ab} + A_{bc}$ *este valabilă*. Acesta este conținutul celei de-a treia axiome.

A patra și ultima axiomă afirmă că, dacă luăm două puncte diferite, de exemplu *a* , *b* în figura noastră, acestea vor fi identificate prin relațiile de distanță *diferite* pe care le au față de alte puncte, astfel încât:

$$\underset{\text{un abdomen}}{\mathbf{Q}_{a}} = \{\mathbf{A}_{ab}, \mathbf{A}, \mathbf{Ad}, \} \text{ ' } \underset{\text{Î.Hr.}}{} \text{ ' } \underset{la}{} \text{ '} \qquad \underset{b}{\mathbf{Qb}} = \{\mathbf{A}_{ab}, \mathbf{Ab}, \mathbf{Abd}\} \underset{ab}{} \text{ ' } \underset{\text{î.Hr.}}{} \text{ ' } \underset{\text{băiat}}{} .$$

Dacă în schimb $\mathbf{Q}_{a} = \mathbf{Q}_{b}$, atunci particulele *a* , *b* ar fi identice ($a = b$), fiind identificate prin exact aceleași relații de distanță cu punctele *c* , *d* .

Totuși, aceste atribuții numerice sunt doar un mijloc de reprezentare a trăsăturilor caracteristice ale relației de distanță. Ele nu fac parte din ontologie și cu atât mai puțin noțiunea de scară absolută care le însoțește. Faptul că valorile atribuite lui A sunt numere reale (și, prin urmare, infinite) nu introduce în sine infinitatea în această ontologie; în plus, nu este legată de o anumită geometrie. Cu alte cuvinte, ar putea fi potrivit să reprezentăm aceste relații într-o geometrie euclidiană tridimensională, dar aceasta este o

chestiune care nu privește ontologia, ci doar reprezentarea acesteia.

O ontologie relaționalistă a particulelor individuate prin distanțe nu este în sine suficientă pentru a construi o teorie care să fie și empiric adecvată: într-o configurație dată, singura variație posibilă este cea dintre distanțele reciproce dintre particule, dar în absența unei astfel de variații, universul rămâne static. Prin urmare, este necesară o a doua axiomă, care afirmă că relațiile de distanță se schimbă, dar nu particulele. Întrucât schimbarea presupune ceva stabil care este în relație cu ceea ce se schimbă și întrucât relaționalismul nu recunoaște un spațiu absolut în care relațiile de distanță sunt încorporate, este necesar ca particulele să rămână stabile, în timp ce relațiile evoluează. Această evoluție dinamică poate fi apoi reprezentată în termeni de mișcare a particulelor care trasează traiectorii continue.

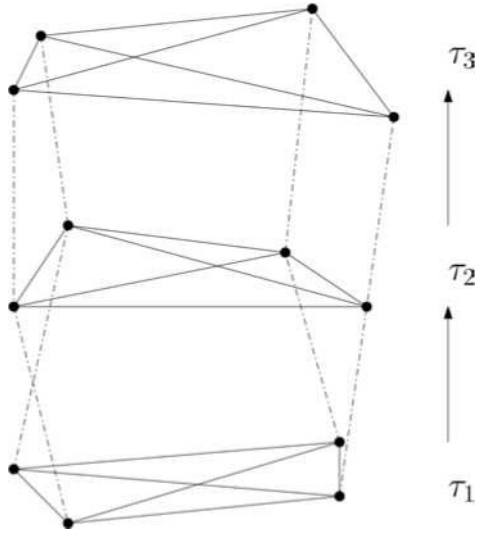


Fig. 2.2 - Evoluția configurației unei particule.

Schimbarea, înțeleasă ca modificare a distanțelor dintre particulele permanente, nu presupune nicio noțiune de timp (de fapt, nu există timp absolut); cu toate acestea, ea manifestă o direcție atunci când starea unei configurații date - constituită din anumite distanțe dintre particule - evoluează într-o altă stare de aceeași configurație, constituită însă din distanțe diferite dintre particule. Fiecare transformare de acest tip poate fi reversibilă, dar timpul are totuși o direcție, în sensul că reprezintă o succesiune definită de stări ale configurației materiei. Pe această bază, Leibniz afirmă, așa cum s-a menționat mai sus, că timpul este ordinea succesiunilor. Ernst Mach (1838-1916), la rândul său, susține o poziție similară spunând, în tratatul său *Mecanica în dezvoltarea sa istorico-critică*

(1883 [1968]), că timpul este o abstracțiune postulată pe baza schimbării (cap. II, §2).

Conform relaționalismului, așadar, nu există timp fără schimbare . În consecință, topologia timpului este absolută, chiar și în absența unei metrici absolute. Singura posibilitate de a introduce o metrică temporală într-o teorie relaționalistă constă în alegerea unui subsistem de particule în configurația universală, în raport cu care se măsoară schimbarea. De exemplu, mișcarea circulară a acului unui ceas constituie un posibil subsistem.

2.3. *Relaționalismul și teoria fizică*

Relaționalismul leibnizian, așa cum este definit de cele două axiome menționate mai sus, se poate spune că promovează atomismul ca ontologie a lumii naturale, care se dovedește a fi cea mai simplă și mai parcimonioasă: în el există doar relații de distanță care individualizează particulele și schimbarea lor; surplusul structural caracterizat de spațiul și timpul newtonian și criticat de Leibniz este astfel evitat. Cu toate acestea, o astfel de ontologie nu poate admite toate modelele - adică toate situațiile posibile - ale mecanicii newtoniene: un univers care conține o singură particulă care se mișcă în spațiu absolut, de exemplu, este un model inadmisibil în contextul relaționalismului. Dacă relațiile spațiale individualizează particulele, cel puțin trei sunt necesare, iar configurațiile care nu satisfac cerința (4) a secțiunii anterioare, adică configurațiile complet simetrice, trebuie excluse. Prin urmare, trebuie stipulat că dinamica este de așa natură încât o configurație dată nu poate evolua într-o configurație complet simetrică - și, în general, într-o configurație care nu satisface cerința (4).

Modele newtoniene care nu pot fi implementate de relaționismul leibnizian

la

Fig. 2.3 - Universul alcătuit dintr-o singură particulă.

Un astfel de univers nu poate fi un model al ontologiei noastre relaționaliste, deoarece particula *a* nu este individuată de nicio relație de distanță.

a $i\backslash_{ab}$ *b*

Fig. 2.4 - Universul alcătuit din două particule.

În acest al doilea caz trebuie să luăm în considerare două fapte: (i) Q = {A a J, și (ii) à ab = à ba . Pe de o parte, setul de relații de distanță pe care le avem pentru perechea de particule (*a* , *b)* constă dintr-un singur element (distanța care separă *a* de *b*) și axioma (1), pe de altă parte, distanța dintre *a* și *b* este egală cu cea dintre *b* și *a* , așa cum este prescris de axioma (2). Cu toate acestea, schema axiomei introdusă în paragraful anterior nu reușește să distingă cele două particule, deoarece acestea sunt caracterizate de exact aceleași relații de distanță, iar acest lucru rezultă din axioma (4) - vezi caseta anterioară pentru un exemplu similar.

Relaționalistul își poate apăra această restricție a teoriei subliniind faptul că lumea reală nu este cu siguranță simetrică. Excluderea unei configurații simetrice a totalității materiei nu exclude posibilitatea unor configurații local simetrice în univers. Mai mult, această restricție nu diminuează valoarea simetriilor în teoriile fizice: acestea sunt de mare importanță în furnizarea unei descrieri simple a evoluției configurației materiei prezente în univers, chiar dacă această configurație nu este simetrică. În cosmologie, de exemplu, ignorarea faptului că distribuția materiei în univers nu este simetrică simplifică foarte mult teoria, fără a pierde însă multe informații despre universul „real", atunci când vine vorba de descrieri la scară cosmologică.

Totuși, așa cum am văzut mai sus, Newton susține că experimentul cu găleata (descris în paragraful 2.1) constituie un

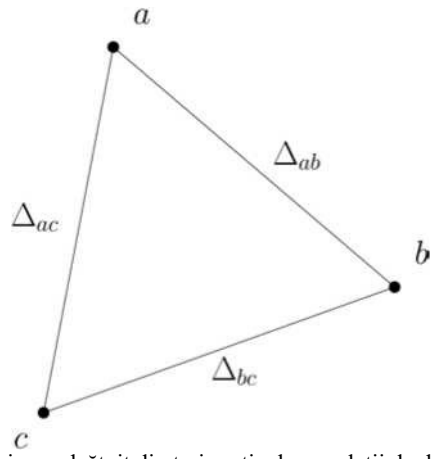


Fig. 2.5 - Univers alcătuit din trei particule cu relații de distanță egale.

Particulele acestei ultime configurații sunt caracterizate **de următoarele** distanțe **Q** = {A $_{ab}$, **A** $_{ac}$, **A** $_{bc}$}, **con** $à_{ab} = à_{ac} = à_{bc}$. Aplicând a patra axiomă ' realizăm următorul fapt: **Q** $_{a}$ **= {A** $_{ab}$, **A** $_{ac}$}, - {A $_{ab}$, A^ } **şi Q** $_{c-f^ac}$, $_{^bc}$, }> Totuși, deoarece aceste relații de distanță sunt identice, obținem că **Q** $_{a}$ **= Q** $_{b}$ **= Q** $_{c}$. Rezultă că particulele ar fi identice, deoarece sunt identificate prin aceleași relații de distanță. Dar această concluzie nu este evident corectă. Prin urmare, trebuie să concluzionăm că cea mai simplă configurație căreia i se aplică ontologia relaționalistă tocmai prezentată este alcătuită din trei particule cu relații de distanță neidentice. Această concluzie poate fi extinsă cu ușurință la cazurile de configurații complet simetrice care conțin $N > 3$ particule, care sunt lăsate ca un exercițiu util pentru cititor.

dovada empirică a existenței spațiului absolut. La aceasta, Mach răspunde că este întotdeauna posibil să clasificăm orice mișcare drept relativă prin extinderea sistemului luat în considerare. În acest sens, putem considera mișcarea de rotație (cum ar fi cea a unei găleți) în raport cu stelele fixe (Mach, 1883 [1968], cap. II.3, §5); în acest caz, de fapt, stelele fixe pot fi tratate ca un sistem de referință cvasi-inerțial în cadrul universului la care putem referi orice mișcare.

Deși prin acest argument, relaționalistul are un răspuns la experimentul de gândire newtonian, ideea unei rotații a universului în ansamblu nu își are locul într-o teorie relaționalistă. În primul rând, leibnizianul poate evalua un model newtonian al unui univers în rotație în același mod în care consideră un

model al unui univers care conține o singură particulă care se mișcă în spațiu absolut, și anume ca ceva ce nu are nicio semnificație pentru lumea reală, deoarece impulsul de rotație al universului este zero **(J =** 0). Cu toate acestea, spre deosebire de modelul care consideră un univers cu o singură particulă, s-ar putea defini un univers în care există un număr mare de particule, la fel ca universul real și căruia teoria newtoniană i-ar atribui o valoare a mișcării de rotație mai mare decât zero (**J** = 0).

Totuși, dacă teoria newtoniană ar atribui universului o valoare **J A 0** , ar face-o pe baza anumitor fenomene observabile în universul însuși, cum ar fi neomogenitățile radiației cosmice de fond. Cu toate acestea, astfel de fenomene permit relaționalistului să admită parametrul **J** și să interpreteze o valoare **J** A 0 (pentru univers în ansamblu) ca o reprezentare simplă și eficientă a acestora și să le explice prin relațiile de distanță schimbătoare dintre particule, mai degrabă decât să considere această valoare ca o invitație la presupunerea ontologică a unui spațiu absolut în care este încorporat universul în rotație.

În general, relaționalistul nu trebuie să dezvolte o teorie fizică alternativă la mecanica newtoniană folosind doar parametri relaționali; el trebuie pur și simplu să refuze să deducă ontologia lumii fizice direct din structura matematică a teoriei newtoniene. Filosoful contemporan Nick Huggett (*1964; Huggett, 2006) arată în detaliu cum este posibil să interpretăm geometria euclidiană și mecanica newtoniană ca constituind un sistem cât mai simplu și informativ posibil pentru evoluția relațiilor de distanță dintre particule. Cu alte cuvinte, presupunând că trăim într-un univers leibnizian, format din particule identificate prin relații de distanță și prin schimbarea lor, cel mai bun lucru pe care l-am putea face pentru a reprezenta această schimbare într-un mod simplu și eficient ar fi să adoptăm geometria euclidiană și mecanica newtoniană: ficțiunea unui spațiu absolut în care să se insereze configurația materiei și a unui timp absolut în care are loc schimbarea distanțelor dintre particule ne permite să facem ca mișcarea inerțială să apară ca o formă de mișcare deosebit de simplă și regulată, și

în consecință, să înțelegem toate schimbările care apar în realitate ca abateri ale unei astfel de mișcări sub influența forțelor[6 7].

Acestea fiind spuse, este la fel de posibil să se dezvolte o teorie fizică relaționalistă a mecanicii clasice ca alternativă la cea a lui Newton , renunțând la noțiuni absolute precum spațiu, timp, mișcare și accelerație. Cel mai cuprinzător program care se îndreaptă în această direcție este cel urmărit de fizicianul britanic Julian Barbour (*1937) și colaboratorii săi încă din anii 1970, nu numai pentru mecanica clasică, ci și pentru fizică în general. În centrul acestui program se află o dinamică care ia în considerare exclusiv forma configurațiilor materiei și nu dimensiunea acestora *(dinamica formei)* .5 Această dinamică, însă, necesită mai multe resurse decât cele puse la dispoziție de cele două axiome prezentate mai sus. Pe lângă distanțele dintre particule, teoria lui Barbour trebuie să se bazeze pe fapte primitive despre unghiuri pentru a utiliza noțiunea de formă ***a*** *unei configurații* ***date*** . Prin cercetările sale, Barbour a obținut o teorie echivalentă empiric cu cea a lui Newton pentru universul real, dar care se bazează pe un formalism mai complex.

Prin urmare, putem vedea cum *simplitatea ontologiei, în sensul parcimoniei, și simplitatea reprezentării tind să ne împingă în direcții opuse.* Dacă ne bazăm pe cea mai simplă ontologie (cum ar fi cea a relaționalismului leibnizian, definită prin cele două axiome menționate anterior), ne lipsesc noțiunile pentru a formula o teorie fizică care să reprezinte schimbarea relațiilor de distanță într-un mod simplu și informativ. Dacă, însă, ne bazăm pe cea mai simplă teorie - presupunând că este newtoniană - și folosim formalismul acesteia ca ghid pentru ontologie , vom obține cu siguranță una mai complexă. În acest caz, de fapt, acceptăm o ontologie care include un spațiu și un timp absolute, mase, impuls, forțe etc. Pe baza acestor considerații, putem afirma că este o greșeală să credem că putem deduce ontologia lumii naturale pornind de la formalismul teoriei fizice pe care alegem să o acceptăm. Rolul formalismului este de a obține o reprezentare schematică și eficientă a schimbărilor observate, nu de a postula o ontologie simplă și coerentă. Prin urmare, *ontologia necesită întotdeauna reflecție filosofică,* precum cea dezvoltată de Leibniz și adresată lui Newton.

Punctul crucial în evaluarea controversei dintre pozițiile substanțialiste și relaționaliste asupra spațiului și timpului este, așadar, acesta: este parcimonia ontologică a relaționalismului un argument concludent în favoarea sa? Există alte argumente care pot învinge parcimonia? Se pune întrebarea dacă angajamentul ontologic față de spațiul absolut contribuie cu ceva pozitiv la explicarea de către o teorie a fenomenelor empirice. Filosoful contemporan

6Vezi și Vassallo *et al .,* 2017.

7Vezi în special Barbour și Bertotti, 1982; Barbour, 2012.

Tim Maudlin (* 1958; Maudlin, 2007, pp. 87–89) consideră noțiunea de cale în spațiul absolut ca fiind primitivă și din aceasta derivă noțiunea de distanță dintre particule, considerând-o calea cu cea mai scurtă lungime în spațiul absolut care leagă două particule. Astfel, el susține că poate explica cerințele care satisfac relația de distanță, cum ar fi inegalitatea triunghiului. Pe scurt, dacă admitem spațiul absolut în ontologie, suntem capabili să oferim o explicație a relației de distanță dintre particule, pe care relaționalistul o admite ca fiind primitivă.

Relaționalistul poate, totuși, să conteste faptul că acesta este un avantaj explicativ. Pentru a putea defini noțiunea de „cea mai scurtă cale în spațiu", substanțialistul trebuie să presupună o structură suficient de bogată pentru a găzdui o metrică - la fel cum relaționalistul trebuie să presupună o relație suficient de bogată pentru a satisface inegalitatea triunghiului pentru ca aceasta să fie considerată o relație de distanță. Dacă spațiul absolut nu ar fi înzestrat cu o astfel de structură ca fapt primitiv, nu ar fi posibil să se deducă relația de distanță implicată de noțiunea de „cale" în spațiu. Pe scurt, substanțialismul nu oferă un avantaj explicativ față de perspectiva relaționalistă: el postulează doar o structură care depășește ceea ce ar fi suficient pentru a explica fenomenele. După cum vom vedea mai târziu, chestiunea avantajului explicativ va deveni crucială pentru orice angajament ontologic care depășește relațiile de distanță care individualează particulele și schimbarea lor.

3. ONTOLOGIE PRIMITIVĂ ȘI STRUCTURĂ DINAMICĂ

3.1. *De la ontologia primitivă la structura dinamică*

Într-o anumită teorie fizică, este necesar să se facă distincția între parametrii introduși pentru a îndeplini o funcție specifică și cei care descriu ceea ce, conform cadrului teoretic respectiv, există pur și simplu în lume. Mai precis, pentru a introduce parametrii *A* care îndeplinesc anumite funcții în cadrul unei anumite teorii, trebuie să existe alții, *B,* în raport cu care primii pot îndeplini efectiv acele funcții. Cu alte cuvinte, nu ar fi posibil să ne gândim la toți parametrii unei anumite teorii fizice ca fiind introduși funcțional, deoarece în acest caz nu s-ar aplica niciunui obiect al teoriei în sine.

În acest sens, considerând mecanica newtoniană, particulele pur și simplu există, prin urmare nu îndeplinesc nicio funcție. Pe de altă parte, în acest context, forțele sunt introduse ca o funcție a evoluției mișcării particulelor: o forță este definită prin modul în care accelerează particulele cărora li se aplică, iar același lucru este valabil și pentru masă. Deși aceasta din urmă are o valoare bine definită și este atribuită particulelor individuale în mecanica clasică, acest parametru nu reprezintă nicio proprietate intrinsecă a acestora, adică nu este o proprietate posedată independent de mediul în care sunt inserate. După cum afirmă Ernst Mach, «adevărata definiție a masei poate fi obținută doar luând în considerare relațiile dinamice ale corpurilor» (1883 [1968], cap. II.7, §2). Masa este, prin urmare, o constantă care permite combinarea mișcărilor particulelor între ele. În mod similar, forțele oferă o descriere a modului în care mișcările particulelor sunt legate între ele. După cum vom vedea mai târziu, în mecanica cuantică, masa nu mai este atribuită particulelor individuale, ci devine un parametru care apare în funcția de undă. Prin urmare, *ontologia primitivă este limitată la pozițiile relative ale particulelor definite prin relații de distanță și la modificările acestora* [8]. În acest context, așa cum am văzut în capitolul anterior, relaționalistul poate folosi relații spațiale pentru a individualiza particulele în așa fel încât esența lor constă în a fi legate între ele prin relații de distanță; orice altceva intră în teoria fizică doar în virtutea funcției pe care o îndeplinește în implementarea modificării pozițiilor lor.

Ontologia primitivă singură este, de fapt, insuficientă pentru construirea unei teorii fizice, deoarece configurațiile particulelor descrise în termeni de relații spațiale nu conțin informații despre evoluția acestor relații. Cu alte cuvinte, dacă avem doar relații spațiale între particule și modificările acestora, putem compila doar o listă lungă de modificări care apar efectiv - într-o anumită configurație, dar acest lucru nu ne permite să formulăm o lege simplă capabilă să surprindă modul în care apar astfel de modificări; pentru a formula efectiv o astfel de lege, sunt necesari alți parametri decât cei legați de ontologia primitivă.

Mai întâi trebuie să decidem ce geometrie să implementăm. Să presupunem că configurația materiei universului $Q = (q1, q2, ..., qN)$, unde $q1, q2, ..., qN$ sunt pozițiile relative ale particulelor, poate fi reprezentată într-un spațiu euclidian tridimensional $\mathbf{S} = \mathrm{R3}$. În acest spațiu alegem o orientare, o rotație, o translație, axe ca și coordonate și direcții $qi - q$. Pe această bază putem concepe apoi evoluția pur relativă a distanțelor dintre particule ca o schimbare în raport cu varietatea **S** în care este definită configurația:

$$t : \mathrm{R} \quad S_N, \qquad t \to (q1_t, \qquad qN_t). \qquad (3.1)$$

8 Cf. Then, 2013 și Vassallo *și colab.*, 2017.

Prin urmare, este posibil să reprezentăm modificările relațiilor de distanță dintre particule printr-un câmp de viteză:

$$(Q)\bullet = dQ\,Q \qquad \text{pentru } 1 \qquad (3.2)$$

Prin inversarea acestei definiții, obținem forma generală a unei legi a mișcării pentru dinamica particulelor:

$$-Qt = vt\,(Qt). \qquad (3.3)$$

Sarcina unei teorii fizice este de a formula o lege specifică care să ne spună cum să determinăm câmpul de viteze *vt* Schimbările observate prezintă anumite tipare sau regularități; un exemplu paradigmatic este mișcarea regulată a planetelor în jurul soarelui. Pe baza unor astfel de observații, o teorie fizică introduce parametri cu valori constante (cum ar fi masa, sarcina, energia totală, constantele naturii) și parametri ale căror valori variază în timp (cum ar fi cantitatea de mișcare, forțele, câmpurile, funcțiile de undă) pentru a ajunge la o lege simplă, informativă, care să ne spună cum evoluează viteza particulelor. Cu alte cuvinte, pe lângă pozițiile relative ale particulelor, valorile altor parametri trebuie determinate ca și condiții inițiale pentru a avea o lege care să descrie variația pozițiilor lor (informațiile despre pozițiile particulelor, de fapt, nu sunt suficiente pentru a dezvolta o astfel de lege). Din nou, legea gravitației a lui Newton (1.2) este un exemplu paradigmatic.

Astfel, scopul unei teorii fizice este de a formula o structură dinamică care, pentru orice configurație dată a materiei care reprezintă universul , este capabilă să cartografieze evoluția acesteia. Mai mult, structura dinamică se aplică tuturor configurațiilor posibile ale particulelor și, prin urmare, poate fi aplicată propozițiilor contrafactuale despre ce s-ar întâmpla dacă o anumită configurație a materiei ar fi reală.

3.2. *De la structura dinamică la probabilități*

Fiecare teorie fizică fundamentală - adică orice teorie fizică care nu poate fi redusă la o alta - este o teorie universală, adică se aplică în principiu întregului univers. Deși atracția gravitațională din teoria lui Newton este calculată pentru perechi de particule (1.2), pentru a cunoaște atracția gravitațională la care este supusă o particulă la un moment dat ar fi necesar să se calculeze riguros influența fiecărei alte particule din univers în același timp, deoarece gravitația este o interacțiune instantanee care se aplică tuturor particulelor conform teoriei newtoniene. Chiar și într-o teorie a interacțiunii locale - cum ar fi electrodinamica clasică, care va fi luată în considerare în

capitolul următor - structura dinamică privește universul ca întreg, deoarece există mărimi care se conservă global, cum ar fi energia totală. În consecință, structura dinamică a unei teorii fizice fundamentale este automat holistică, referindu-se la întregul univers, chiar dacă ontologia primitivă a teoriei este atomistică.

Totuși, nu putem cunoaște întregul univers. Uneori ne aflăm în situația norocoasă de a putea ignora restul universului atunci când calculăm atracția gravitațională dintre două obiecte aplicând legea (1.2); acesta este cazul atunci când se calculează traiectoria unei planete care se mișcă în jurul soarelui sau cea a unei pietre care cade pe pământ. Aceste cazuri, însă, sunt excepția și nu regula. În general, nu cunoaștem condițiile inițiale exacte ale sistemelor pe care le considerăm, nici pe cele ale mediului lor, iar această ignoranță ne împiedică să facem calcule deterministe. O teorie fizică universală ar fi, prin urmare, inutilă dacă nu ar conține o metodă de abordare a unor astfel de situații. Cu alte cuvinte, o teorie trebuie să poată răspunde la următoarea întrebare: dat fiind un sistem fizic dat, ce evoluție ne putem aștepta dacă ignorăm condițiile sale inițiale exacte?

Să luăm, de exemplu, aruncarea unei monede, care, după cum se știe, are doar două rezultate posibile (cap sau pajură). În general, nu cunoaștem nici condițiile inițiale exacte ale monedei, nici mișcarea care o propulsează prin aer. Cu toate acestea, știm că o incertitudine minimă în condițiile inițiale implică o incertitudine maximă în rezultat: acesta nu poate fi prezis, deoarece o modificare minimă a condițiilor inițiale îl poate modifica drastic. Pentru a depăși această problemă, putem afirma că, dacă luăm în considerare secvențe de aruncări și nu doar o singură încercare, de obicei (adică, în marea - majoritate a cazurilor), acestea vor arăta o distribuție aproximativ egală pentru rezultatele cap și pajură, adică ~50% din cazuri sunt în favoarea capului și ~50% în favoarea pajurii.

În general, dacă ne referim la formularea legilor mecanicii clasice de către Sir William Hamilton (1805–1865), putem observa că acestea sunt legate de o măsură de probabilitate – în acest caz măsura Lebesgue, numită după matematicianul francez Henri Lebesgue (1875–1941) – care ne permite să deducem mecanica statistică din mecanica clasică. Prin urmare, este posibil să se formuleze propoziții probabilistice semnificative în situații în care practic ignorăm condițiile inițiale exacte. Chiar dacă probabilitățile sunt prezente într-o teorie deterministă din cauza necunoașterii noastre cu privire la condițiile inițiale exacte ale diferitelor situații fizice, acestea sunt obiective, deoarece sunt legate de legile naturii. De exemplu, este un fapt obiectiv al lumii și, prin urmare, independent de cunoștințele noastre, că secvențe lungi de aruncări de monede prezintă de obicei o distribuție egală pentru ambele

rezultate posibile [9].

Există așadar trei elemente într-o teorie fizică: o ontologie primitivă (obiectele la care se referă teoria), o structură dinamică (legile evoluției acestor obiecte și parametrii care apar în ecuațiile mișcării) și o măsură de probabilitate, care ne permite să deducem propoziții despre comportamentul obiectelor de care se ocupă teoria chiar și în cazurile în care ignorăm - condițiile lor inițiale exacte. Aceste trei elemente formează fundamentul pentru explicarea fenomenelor care se încadrează în domeniul în care se aplică teoria respectivă. Se poate spune că în fizică toate observațiile experimentale constau în înregistrarea pozițiilor obiectelor discrete; la prima vedere, orice rezultat al unei măsurători este înregistrat sub forma unor poziții precise ale unor astfel de obiecte, cum ar fi poziția acului unui dispozitiv, configurația punctelor pe un ecran etc. În plus, obiectele care nu sunt particule (cum ar fi undele sau câmpurile) apar în explicația mișcării lor, dar nu fac parte strict din dovezile experimentale: nu vedem unde, ci doar efectele lor asupra mișcării particulelor. Astfel, un câmp electric este examinat prin mișcarea unei sarcini de test.

Din cele spuse până acum, pare posibil să se formuleze un argument pentru propunerea unei ontologii primitive a particulelor, deoarece o astfel de ontologie pare a fi cea mai bună explicație pentru dovezile experimentale actuale. Cu toate acestea, explicația fenomenelor macroscopice nu se bazează doar pe faptul că sunt compuse din particule, ci și pe dinamica formulată pentru a descrie evoluția lor temporală: de fapt, aceasta din urmă explică stabilitatea obiectelor macroscopice, iar măsura probabilității este cea care stă la baza explicațiilor atunci când ignorăm condițiile inițiale exacte ale situațiilor fizice investigate.

3.3. *Structura dinamică inclusă în ontologie*

Este ontologia naturii constituită exclusiv din ontologia primitivă? Sau face parte și structura dinamică din aceasta (constituind o ontologie secundară, ca să spunem așa, în măsura în care este introdusă datorită funcției sale în evoluția dinamică a ontologiei primitive)? Dezbaterea din jurul acestei întrebări este aceeași cu cea discutată în capitolul precedent despre statutul ontologic al spațiului și timpului: întrebarea este dacă acestea fac parte din ontologie sau dacă sunt doar mijloace de reprezentare, ceea ce implică faptul că ontologia se reduce la relații de distanță dintre particule și schimbarea lor.

9 Cf. Lazarovici și Reichert, 2015.

Legile naturii explică mișcarea particulelor, dar căutarea explicației nu se termină cu unificarea unui număr mai mare de mișcări posibile pe baza unei legi simple. De asemenea, se caută un răspuns la întrebarea de ce configurația materiei în univers evoluează într-un anumit fel și nu în altul. Acordarea unui statut ontologic legilor naturii răspunde la această întrebare. În acest sens, Maudlin (2007) nu numai că acceptă spațiul absolut în ontologia sa pentru a explica trăsăturile caracteristice ale relațiilor de distanță dintre particule (vezi concluzia capitolului precedent), dar consideră și că legile naturii însele fac parte din aceasta: legile sunt primitive. Ele impun constrângeri asupra mișcării particulelor, adică o generează și, în același timp, o explică.

Alți filozofi, însă, reduc legile la proprietăți ale particulelor, adică la anumite dispoziții sau puteri cauzale care produc o anumită mișcare [10]. În acest fel, proprietăți precum masa sau sarcina ar fi dispoziții a căror ființă (sau esență) constă în faptul că, posedându-le, o particulă este accelerată și/sau rezistă accelerației. Evoluția dinamică a particulelor este caracterizată ca o manifestare a dispozițiilor în cauză, iar aceste dispoziții, la rândul lor, se disting prin modul în care determină starea de mișcare a particulelor: o particulă își modifică starea de mișcare față de altele în funcție de masa și sarcina sa. Același lucru este valabil și pentru diferențele dintre valorile masei și sarcinii: legile naturii reprezintă aceste puteri sau dispoziții, deoarece ele generează mișcarea particulelor.

Obiecțiile la adresa acestei perspective asupra legilor naturii sunt analoage cu cele împotriva includerii spațiului și timpului absolut în ontologia unei teorii date. La prima vedere, aceasta pare a fi o supraabundență de structură: chiar presupunând că dispozițiile în cauză se manifestă spontan - adică fără a fi supuse stimulilor externi - sunt posibile situații în care acestea sunt prezente, dar nu influențează direct mișcarea particulelor. În acest sens, de exemplu, poate exista o situație în care starea de mișcare a particulelor nu se schimbă deoarece forța atractivă generată de mase, pe de o parte, și forța de respingere generată de sarcini egale, pe de altă parte, se anulează reciproc.

În plus, și aceasta este cea mai importantă obiecție, se poate argumenta că explicațiile care utilizează astfel de aranjamente sunt circulare: ele nu explică de ce particulele se atrag reciproc pe baza masei, deoarece aceasta este *definită* de funcția îndeplinită pentru mișcare.

10 Vezi, de exemplu, Bird, 2007 și Mumford, 1998, 2004.

de particule. Astfel, dacă masa este o dispoziție, ea este considerată o dispoziție la atracția reciprocă între particule. Totuși, aceasta este caracterizată ca o explicație caricaturală, ca să spunem așa, așa cum scrie Molière (1622-1673) în *Invalidul imaginar* (1673): nu se poate explica de ce oamenii adorm după ce consumă opiu atribuindu-i o „virtute dormitivă", deoarece această „virtute" este definită tocmai ca puterea de a-i face să adoarmă pe cei care folosesc această substanță. Masa, sarcina etc. sunt parametri fizici fundamentali, contrar proprietăților fenomenologice ale opiului; totuși, acești parametri sunt definiți de funcția îndeplinită pentru mișcarea particulelor, la fel cum „virtutea dormitivă" este definită de funcția de a-i adormi pe cei care folosesc opiu. Același argument se extinde la primitivismul privind legile naturii: acestea sunt de fapt definite de modificarea stării de mișcare a particulelor pe care le descriu.

Considerând relațiile de distanță dintre particule și modificările lor într-un spațiu absolut datorate acțiunii dispozițiilor, atribuim statut modal trăsăturilor caracteristice ale acestor relații (care sunt necesare deoarece definesc spațiul absolut) și atribuim statut modal modificărilor care au loc în lume: acestea sunt necesare dacă apar din dispozițiile care generează aceste modificări. În acest caz, obiecția este simplă, deoarece schimbarea statutului a ceva din contingent în necesar nu oferă o explicație pentru acesta.

Într-adevăr, în loc să se formuleze un răspuns profund la întrebarea de ce apar schimbări în distribuția particulelor și în distanțele lor reciproce, atribuirea unui statut ontologic structurii dinamice ridică noi probleme: dacă legile sunt primitive, se pune întrebarea cum acestea, nefiind obiecte concrete în lume, pot influența mișcarea particularităților concrete. Mai mult, dacă legile sunt reduse la dispoziții ale acestor obiecte, se pune întrebarea cum o particulă, în virtutea dispozițiilor sale intrinseci, poate influența mișcarea *altora* prin spațiu. În capitolul următor, vom vedea de ce această problemă nu este rezolvată prin introducerea unor *medii* precum câmpurile.

3.4. *Metafizica humeană*

La fel ca relaționalistul, care consideră spațiul și timpul doar ca instrumente geometrice pentru a reprezenta relațiile de distanță dintre particule și schimbarea lor, tot așa cei care susțin poziția conform

Fizica, care nu acordă statut ontologic structurii dinamice, o consideră doar un instrument de reprezentare a evoluției dinamice a relațiilor dintre particule. Schimbările în configurația materiei universului accesibil nouă (inclusiv schimbările din mediul nostru familiar) manifestă modele regulate. Prin conceptualizarea acestor modele sau regularități, fizica caută să creeze un sistem de reprezentare care să găsească cel mai bun echilibru între simplitate și informație în ceea ce privește schimbările observabile din univers. Un sistem pur logic ar fi foarte simplu, dar neinformativ. Un sistem care înregistrează toate schimbările accesibile ar fi foarte informativ, dar deloc simplu. Legile naturii, pe de altă parte, sunt simultan simple și informative, asigurând cel mai bun echilibru între aceste două trăsături. Această concepție a legilor naturii este inspirată de filosoful scoțian David Hume (1711-1776) și a fost dezvoltată în epoca contemporană în special de Frank Ramsey (1903-1930) și David Lewis (1941-2001) și este caracterizată ca un element central al poziției cunoscute astăzi sub numele de „metafizică humeană" .

Să presupunem că ontologia primitivă constă în relații de distanță dintre particule și schimbările lor. Dacă aceasta constituie întreaga ontologie a domeniului fizic, atunci parametrii care apar în ecuațiile teoriilor fizice intră în joc în virtutea funcției pe care o joacă în legile acelei teorii, care, la rândul ei, urmărește să descrie schimbările observabile cât mai simplu și informativ posibil. În consecință, parametri precum masa sau sarcina nu reprezintă proprietăți intrinseci ale particulelor ca atare. Ei joacă un rol în legile care oferă o descriere simplă și informativă a schimbării în natură (deși valorile inițiale ale acestor parametri trebuie specificate ca și condiții inițiale pentru a avea legi simple).[11] [12].

Predicate precum „a avea masă" și „a avea sarcină " se aplică obiectelor fizice, iar propozițiile în care apar acestea sunt aproximativ adevărate. Totuși, ceea ce le face aproximativ adevărate și, prin urmare, face ca aplicarea acestor predicate să fie adecvată, nu este o masă sau o sarcină intrinsecă în particule, ci modificarea relațiilor de distanță dintre particule, care apar într-un mod atât de regulat încât legile în care apar parametri precum masa și sarcina sunt cel mai simplu *și mai* informativ sistem pentru reprezentarea acestei schimbări. În general, metafizica lui Hume nu este o formă de instrumentalism, ci mai degrabă realism științific, prin faptul că postulează o ontologie primitivă ale cărei elemente - cum ar fi particulele identificate prin relații de distanță și modificarea lor - ar trebui să existe independent de accesul nostru epistemic la astfel de entități. În consecință, structura dinamică a unei teorii fizice nu este pur și simplu un instrument pentru derivarea predicțiilor, ci își asumă și o

11 Cf. în special Lewis, 1973a, pp. 72-75 din 1994, sec. 3; și Hall, 2009.
12 Cf. Hall, 2009, § 5.2

funcție cognitivă, și anume, oferind cea mai simplă și mai informativă descriere a evoluției dinamice a ontologiei primitive accesibile nouă. Pe scurt, metafizica lui Hume acceptă pachetul format dintr-o geometrie, legi și o măsură de probabilitate, în loc să utilizeze doar regula derivată din acest pachet pentru a calcula probabilitățile rezultatelor măsurătorilor. Cu toate acestea, această abordare refuză să acorde statut ontologic elementelor acestui pachet care nu sunt conținute în ontologia primitivă.

David Lewis caracterizează metafizica humeană astfel:

> Este doctrina conform căreia tot ce există în lume este un mare mozaic de aspecte locale, de fapte particulare, doar un lucru mic și apoi încă unul. [...] Avem geometrie: un sistem de relații externe de distanță spațio-temporală între puncte. Poate puncte ale spațiului-timpului în sine, poate puncte ale materiei, sau eterului, sau câmpurilor, poate ambele. Și în aceste puncte sunt situate calități locale: proprietăți intrinseci perfect naturale care nu au nevoie de nimic mai mare decât un punct în care să fie instanțiate. Pe scurt: avem un aranjament de calități. Și asta e tot (Lewis, 1986a, vol. II, pp. ix - x).

Conform acestui citat, Lewis admite nu doar puncte în spațiu-timp, ci și proprietăți intrinseci instanțiate în aceste puncte; el consideră masa, sarcina etc. ca proprietăți intrinseci în mod natural și aparținând obiectelor punctuale. Totuși, această concepție pune metafizica humeană într- o dilemă: Lewis, de fapt, nu poate susține că rolurile jucate de parametrii masei și sarcinii în contextul legilor naturii constituie esența unor astfel de proprietăți . În acest caz, aceste proprietăți ar fi dispoziții sau puteri, iar el ar fi hotărât să recunoască faptele modale ca fiind primitive în lume (cum ar fi conexiunile necesare care generează aceste proprietăți, vezi secțiunea anterioară). Lewis susține că rolul jucat în legile naturii de parametri precum masa sau sarcina este condiționat de proprietățile pe care le desemnăm prin masă sau sarcină etc. Esența acestor proprietăți este, așadar, o calitate pură (cunoscută sub numele de „quidditas"), la care, în plus, nu putem avea niciun acces cognitiv – această ultimă consecință este numită „umilință" în contextul humean, iar Lewis (2009) admite consecințele ambelor. Cu toate acestea, ele constituie obiecții serioase la adresa metafizicii humeene în viziunea lui Lewis [13], deoarece aceasta se propune ca o metafizică empiristă și asemănătoare științei, fără calități oculte.

Spre deosebire de metafizica humeană a lui Lewis, putem caracteriza drept „metafizică supra-humeană" poziția care nu admite niciun statut ontologic nici spațiului și timpului absolut, nici proprietăților intrinseci care [14]... Metafizica supra-humeană respinge aceste postulate ontologice și reține doar relațiile de distanță care individualează punctele materiale și schimbarea lor.

13 Cf. Black, 2000.
14 Cf. Esfeld și Deckert, 2017, cap. 2.3.

Relațiile de distanță sunt, prin urmare, relații naturale, singurele relații naturale. Această ontologie constituie o bază suficientă pentru introducerea legilor naturii care reprezintă această schimbare în cel mai simplu și informativ mod posibil.

Odată ce aceste legi sunt definite, metafizica lui Hume poate trata și noțiunea de cauzalitate în același mod. Urmându-l pe Hume, cauzalitatea poate fi considerată în termeni de regularitate [15]. Răspunsul la întrebarea dacă un eveniment *e1 provoacă un* alt eveniment *e2* depinde strict de faptul dacă evenimente de același tip ca *e2* rezultă în mod regulat din evenimente de același tip ca *e1* sau nu. Cu alte cuvinte, *e1* îl provoacă pe *e2 dacă* și numai dacă, în circumstanțe similare, toate evenimentele de același tip ca *e1* sunt urmate de evenimente de același tip ca *e2* . Prin urmare , cauzalitatea este redusă la o succesiune regulată de evenimente aparținând aceleiași clase/de același tip.

Una dintre obiecțiile centrale la adresa teoriei cauzalității ca simplă regularitate se referă la faptul că evenimentele care se întâmplă o singură dată în istoria universului (cum ar fi „Big Bang"), adică unice, pot intra totuși în relații cauzale. Acesta este unul dintre motivele pentru care marea majoritate a filosofilor contemporani care lucrează în cadrul metafizicii humiene susțin o teorie a cauzalității în termeni de dependență contrafactuală. Adică, ei se bazează pe următoarea intuiție: să luăm în considerare un eveniment *e2* , cum ar fi, de exemplu, un geam spart. În trecutul acestui eveniment, a avut loc următorul eveniment (*e1)* : o minge de fotbal a lovit geamul. Este atunci posibil să se enunțe următoarea propoziție contrafactuală: „Dacă mingea de fotbal nu ar fi lovit geamul, geamul nu s-ar fi spart". Ideea generală este următoarea: un eveniment *e1 este* un factor cauzal relevant (o cauză) a unui eveniment *e2 dacă* și numai dacă următoarea propoziție contrafactuală este adevărată: dacă *e1 nu s-ar fi* produs , *e2* nu s-ar fi produs (sau, cel puțin, ar fi fost mai puțin probabil).

David Lewis, în special, propune o teorie care definește cauzalitatea folosind noțiunea de dependență contrafactuală (1973b, 2004). Deși în Lewis (1986b) susține că există și alte lumi posibile în afara lumii reale, realismul său despre lumile posibile se referă în primul rând la analiza semantică a propozițiilor contrafactuale. Acest realism este independent de teoria sa despre cauzalitate. Metafizica humeană implică faptul că ontologia primitivă a lumii reale (mozaicul humean) este suficientă pentru a fixa legile naturii lumii reale și relațiile sale cauzale. În consecință, ontologia primitivă a lumii reale este potrivită și pentru determinarea valorilor de adevăr ale propozițiilor contrafactuale în raport cu aceasta [16].

Pe scurt, metafizica lui Hume consideră totalitatea schimbărilor în relațiile

15 Cf. *Tratatul despre natura umană* (1739), Cartea I, Partea a III-a, și *Cercetările asupra intelectului uman* (1748), Secțiunea a VII-a)

16 Cf. Armstrong, 2004, p. 445; Loewer, 2007, pp. 308-316.

de distanță dintre particule (adică mișcarea lor) ca un fapt primitiv și contingent. Pe baza acestor considerații, această metafizică explică tot restul (legi, relații cauzale, propoziții contrafactuale etc.) prin teoria care descrie cel mai bine această schimbare, atingând cel mai bun echilibru între simplitate și informativitate. Cu toate acestea, această abordare metafizică nu oferă un motiv pentru care mișcarea particulelor are loc așa cum are loc: se pune, prin urmare, întrebarea dacă putem face mai bine. Acceptarea legilor, sau a dispozițiilor, sau a puterilor ca fiind primitive duce la o ciocnire cu obiecțiile de circularitate și surplus structural și duce la crearea de noi probleme.

4. DE LA MECANICA CLASICĂ LA FIZICA RELATIVĂ

4.1. *Electrodinamică*

Să revenim pentru o clipă la teoria gravitației a lui Newton. Așa cum s-a explicat în secțiunea 1.3, gravitația este o interacțiune instantanee între toate particulele de o configurație dată; aceasta înseamnă, în consecință, că nu există niciun *mediu* care să o transmită. La rândul său, însă, Newton respinge ideea unei interacțiuni care se propagă instantaneu prin spațiu, chiar dacă teoria sa implică faptul că gravitația este tocmai o astfel de interacțiune. Gravitația este, de asemenea, singura forță pentru care a formulat o lege precisă, chiar dacă nu este singurul tip de interacțiune care există între particule. Există, de asemenea, electricitatea și magnetismul, deși o teorie care le tratează în mod adecvat și unificabil a fost formulată abia la aproape două sute de ani după Newton, și anume electrodinamica lui James Clerk Maxwell (1831-1879), dezvoltată în 1860. Teoria lui Maxwell implementează noțiunea de *acțiune locală:* se postulează existența unui câmp care se propagă în spațiu și acționează ca mediator al interacțiunii dintre particule, contrar a ceea ce se întâmplă în teoria newtoniană menționată anterior.

Mai precis, fiecare particulă încărcată (pozitivă sau negativă) creează un câmp în jurul său, care se extinde prin spațiu cu o viteză finită și constantă: nu depinde de starea de mișcare a sursei sale. În acest caz, interacțiunea dintre particule are loc prin câmpurile pe care le generează: o particulă încărcată

accelerează alte particule încărcate (le atrage sau le respinge) prin câmpul pe care îl creează în jurul său. Prin urmare, câmpul este un mecanism de interacțiune între particule. Dacă fiecare interacțiune are loc printr-un mediu, atunci acestea nu sunt instantanee, ci întârziate: propagarea efectelor are loc cu o viteză finită. Aceasta se numește acțiune locală, spre deosebire de acțiunea la distanță.

Teoria electrodinamicii a lui Maxwell introduce astfel o nouă entitate în fizică: câmpul electromagnetic. La acea vreme, eterul a fost propus ca un tip de mediu material care susține câmpuri în spațiu, dar această ipoteză a fost abandonată la sfârșitul secolului al XIX -lea. Prin urmare, se pare că materia este alcătuită nu doar din particule, ci și din câmpuri. Mai precis, ne putem gândi la un singur câmp electromagnetic care dă naștere tuturor particulelor încărcate din univers. Spațiul dintre particule nu este, așadar, gol, ci „umplut", ca să spunem așa, de câmpul electromagnetic.

Totuși, situația este mai complicată decât sugerează această prezentare simplificată a teoriei lui Maxwell. Ca multe dualisme, dualismul dintre particule și câmpuri pune probleme; la prima vedere, de fapt, teoria electrodinamicii este, strict vorbind, inconsistentă . Fiecare particulă creează un câmp în jurul ei (sau contribuie la un singur câmp electromagnetic) și, în consecință, afectează mișcarea *altor* particule prin acel câmp. Acesta din urmă, însă, afectează și mișcarea particulei care este propria sa origine. Acum, dacă încercăm să calculăm influența câmpului asupra particulei care îl generează, teoria se prăbușește: energia devine infinită în punctul în care este poziționată particula. În general, dacă luăm în considerare câmpurile externe, putem calcula influența lor asupra mișcării particulelor încărcate folosind ecuația lui Hendrik Lorentz (1853–1928); în schimb, având în vedere pozițiile particulelor încărcate în cauză, este posibil să se calculeze câmpurile pe care le generează sau chiar contribuția lor la câmpul electromagnetic individual, folosind ecuațiile de câmp ale lui Maxwell. Cu toate acestea, nu este posibil să se unească aceste două tipuri de ecuații într-o teorie fizică coerentă. Această problemă persistă până în zilele noastre și reapare în teoria cuantică a câmpurilor, așa cum vom vedea mai jos (Capitolul 11).

4.2. *Câmpurile aparțin ontologiei?*

La fel ca spațiul absolut, câmpurile se extind la infinit, mult dincolo de sfera influenței lor asupra mișcării particulelor. La fel ca în cazul spațiului și timpului absolut, se pune astfel întrebarea statutului lor ontologic: sunt câmpurile proprietăți, adică proprietățile punctelor din spațiu-timp? Sau sunt ele un fel de materie care îl umple?

În primul caz, se subscrie la un substanțialism în ceea ce privește spațiu-

timpul: există un spațiu, spațiu-timpul absolut, ale cărui puncte posedă proprietăți de câmp pe lângă proprietățile geometrice [17]. Acestea din urmă, însă, sunt proprietăți autentice ale spațiu-timpului; ar fi destul de ciudat să atribuim, pe lângă acestea, proprietăți cauzale sub forma proprietăților de câmp punctelor spațiu-timpului; acestea ar influența doar mișcarea anumitor particule, și anume, a celor încărcate. Cu alte cuvinte, dacă proprietățile punctelor spațiu-timp sunt cauzale, în sensul că influențează mișcarea materiei, ele ar trebui să aibă un efect asupra mișcării *tuturor* particulelor, și nu doar a celor încărcate. Tocmai universalitatea gravitației este, de fapt, cea care face posibilă geometrizarea acesteia în teoria relativității generale, așa cum vom vedea în capitolul următor.

Pe de altă parte, dacă considerăm proprietățile câmpului ca fiind aranjamente , ne confruntăm cu următoarea problemă: manifestarea principală a proprietății dispoziționale (adică sarcina particulelor) este accelerarea altor particule. Câmpul în sine nu este manifestarea acestui aranjament, dar în acest context trebuie interpretat ca și cum ar fi. Proprietatea dispozițională originală (sarcina) generează apoi un alt aranjament (proprietățile câmpului electromagnetic), iar aceste două se manifestă în accelerarea particulelor. Prin urmare, în acest caz, există două aranjamente diferite care se manifestă în același mod.

Dacă câmpurile sunt definite ca un tip de materie care umple spațiu-timpul, atunci două tipuri diferite de materie îl locuiesc : în timp ce particulele sunt obiecte discrete, materia sub formă de câmp este un continuum. Mai mult, deși este posibil să se utilizeze relații spațiale pentru a identifica obiecte discrete (particule), acest lucru nu este valabil și pentru câmpuri. Acestea sunt, așadar, un tip fundamental de materie și, întrucât esența lor este caracterizată, ca să spunem așa, ca un substrat gol, se presupune ca fapt primitiv că pot lua valori diferite în diferite puncte ale spațiu-timpului. Mai mult, în cazul câmpului electromagnetic, pot exista puncte sau regiuni ale spațiu-timpului în care valoarea acestui câmp este zero. În aceste cazuri, ne întrebăm: nu există materie în aceste regiuni? Sau materia câmpului există peste tot, dar nu exercită niciun efect asupra particulelor?

Statutul câmpurilor nu este identic cu cel al particulelor. Toate dovezile experimentale din fizică se bazează pe observarea pozițiilor relative ale obiectelor discrete și a modificărilor acestora. Astfel, un câmp electric este sondat prin mișcarea particulelor de testare încărcate supuse câmpului în sine. În consecință, entitățile neparticulare - cum ar fi undele sau câmpurile - sunt incluse în teorie ca parte a explicației mișcării particulelor, dar nu fac parte din datele experimentale.

17Cf. Field, 1980, cap. 4, în special p. 35; și 1985, pp. 40-42.

Semnificația fizică a mărimii matematice asociate cu valoarea câmpului care poate fi atribuită unui punct generic în spațiu- timp, chiar dacă nu este ocupat de nicio particulă, constă în faptul că ne permite să formulăm propoziții de acest tip: „Dacă ar exista o particulă în acest punct, s-ar mișca în felul cutare." Desigur, trebuie să admitem în ontologie *factori de adevăr* pentru aceste propoziții contrafactuale (care sunt adevărate și verificabile prin experimente); cu toate acestea, nu rezultă că trebuie să recunoaștem câmpurile ca parte a ontologiei noastre.

Cu alte cuvinte, câmpurile nu fac parte din ontologia primitivă, ci din structura dinamică a unei teorii fizice: ele sunt introduse în virtutea funcției lor pentru ontologia primitivă, și anume, mișcarea particulelor. Aceasta deschide posibilitatea excluderii unor astfel de entități din ontologie: ele pot fi considerate o modalitate eficientă de a ajunge la o descriere simplă și ușor aplicabilă a mișcării particulelor. Mișcarea reală a particulelor face ca toate propozițiile adevărate și verificabile în care apar mărimi de câmp să fie adevărate.

Richard Feynman a spus în discursul său de acceptare a Premiului Nobel din 1965:

> [vedeți], dacă toate sarcinile contribuie la un singur câmp universal și dacă acel câmp universal însuși acționează asupra tuturor sarcinilor, atunci fiecare dintre ele trebuie să acționeze asupra sa însăși pe rând. Ei bine, aici a fost greșeala: nu exista niciun câmp. Doar că atunci când agiți o sarcină, alta oscilează în continuare. A existat o interacțiune directă între sarcini, deși cu o întârziere [...]. Acum, acest lucru are caracteristica interesantă de a rezolva ambele probleme simultan. În primul rând, pot afirma imediat că nu am lăsat electronul să acționeze asupra sa însăși, ci doar am lăsat un electron să acționeze asupra celorlalți - deci, fără energie proprie! În al doilea rând, nu există un număr infinit de grade de libertate în câmpuri. De fapt, nu există deloc câmp (Feynman, 1966, pp. 699–700; trad. de A. Oldofredi).

În jurul anului 1940, Feynman a dezvoltat, împreună cu John A. Wheeler (1911–2008), conducătorul său de teză, o teorie alternativă la electrodinamică, formulată în termeni de interacțiuni directe între particulele încărcate prin spațiul vid, fără parametri de câmp în cadrul dinamic; aceasta este cunoscută sub numele de teoria Wheeler-Feynman [18]. Pentru a reproduce rezultatele

Conform electrodinamicii maxwelliene, această teorie trebuie să postuleze nu doar o acțiune întârziată, ci și una anticipată: mișcarea unei particule într-un punct din spațiu-timp depinde nu numai de traiectoriile particulelor din trecutul său, ci și de cele din viitorul său. Vedem imediat, însă, că această propunere teoretică este afectată de o problemă foarte serioasă: nu este clar

18Cf. Wheeler și Feynman, 1945.

care sunt condițiile inițiale care ne permit să găsim soluții la ecuațiile sale. În această teorie, ♦ #1 1# ♦♦ I## ♦ * * •
de fapt, nu există date disponibile situate pe o hipersuprafață spațială la un moment dat care să poată servi drept condiții inițiale pentru calcularea soluțiilor ecuațiilor.

Motivul pentru care parametrii câmpului sunt atât de puternici este că ne permit să gestionăm interacțiunile întârziate, precum și să găsim soluții la ecuații prin introducerea unor valori inițiale adecvate: mișcarea unei particule date este determinată de valorile câmpului din trecutul său imediat. Chiar dacă interacțiunea electromagnetică este întârziată, nu este necesar să se ia în considerare mișcarea altor particule din trecutul îndepărtat (sau viitor) pentru a calcula mișcarea unei particule date. Cu alte cuvinte, deși este posibil să se formuleze teoria gravitațională a lui Newton sub forma unui câmp gravitațional, nu există niciun motiv pentru a favoriza această formulare, deoarece această interacțiune este instantanee. Așa cum s-a menționat în Secțiunea 1.3, termenul corespunzător forței gravitaționale poate fi eliminat din calcule, deoarece atracția gravitațională dintre două particule este determinată de pozițiile și masele lor la un moment dat. Pentru a găsi o soluție la a doua lege a lui Newton pentru forța gravitațională, este suficient să se introducă pozițiile, vitezele și masele particulelor ca și condiții inițiale. Pe de altă parte, atunci când interacțiunea este întârziată, ca în electrodinamică, parametrul câmpului este indispensabil pentru a putea formula soluții la ecuațiile date prin introducerea unor valori inițiale.

Pe scurt, este așadar clar că câmpurile au o funcție dinamică. Dacă se refuză admiterea lor în ontologie, se poate recurge la aceleași strategii disponibile relaționalistului care refuză să admită spațiul și timpul absolute ale fizicii newtoniene în ontologia sa: fie să se dezvolte o teorie fizică alternativă (teoria relaționalistă a lui Barbour în mecanică, teoria Wheeler-Feynman în electrodinamică), fie să se adopte poziția (super-)Humeană, care interpretează structura dinamică doar ca mijloc de reprezentare, ontologia fiind în întregime fixată de ontologia primitivă a pozițiilor particulelor și a schimbărilor acestora (este chiar posibil să se urmărească aceste două strategii simultan).

4.3. *Teoria relativității speciale*

Faptul că în electrodinamică interacțiunea dintre particule este întârziată implică faptul că aceasta nu poate fi concepută în spațiul și timpul newtonian, deoarece există o viteză limită de propagare a efectelor. Albert Einstein a derivat consecințele acestui fapt în teoria sa a relativității speciale, introdusă în articolul intitulat *„Despre electrodinamica corpurilor în mișcare* ” (Einstein, 1905). Această teorie își bazează reflecțiile pe următoarele două

principii:

1. *Toate sistemele de referință inerțiale sunt echivalente pentru descrierea fenomenelor fizice.* Așa cum s-a menționat în Secțiunea 2.1, acest principiu datează din vremea lui Galileo; Einstein l-a adoptat pur și simplu. Este important de menționat că, deși toate sistemele de referință inerțiale sunt echivalente din punct de vedere fizic, poate fi practic să se aleagă unul anume pentru a descrie o anumită situație fizică. Cu toate acestea, nu există niciun sistem de referință inerțial care să aibă în mod obiectiv un statut privilegiat.
2. *Lumina se propagă cu o viteză constantă în vid și în raport cu orice sistem de referință inerțial* .

Al doilea principiu, care afirmă constanța vitezei luminii, este fundamental nou. În teoria electrodinamicii a lui Maxwell, viteza de propagare a câmpului electromagnetic emis de o particulă încărcată în mișcare nu depinde de viteza acesteia din urmă; în plus, experimentul lui Michelson și Morley din 1887 arată că, într-un sistem de referință inerțial, viteza luminii - mai precis, media vitezelor la care lumina se propagă în ambele direcții între două puncte fixe - este identică în toate direcțiile spațiului. Prin urmare, Einstein a luat principiul constanței vitezei luminii ca punct de plecare pentru dezvoltarea unei teorii fizice, trăgând astfel consecințele ideii de interacțiuni întârziate între particule și, prin urmare, transmitere la o viteză finită. Lumina se propagă cu o viteză de aproximativ 300.000 de kilometri pe secundă, indiferent de starea de mișcare a sursei sale.

Postulatul constanței vitezei luminii îi permite lui Einstein să formuleze o dinamică fără a recurge la conceptul de timp universal - un timp, adică, care impune o ordine temporală unică, obiectivă, tuturor evenimentelor din univers. Acest principiu oferă un fel de *element absolut* teoriei relativității speciale. Din aceste două principii, Einstein ajunge la *natura relativă a distanțelor spațiale și temporale* (1905, §§ 1 și 2) - și acestei concluzii îi datorează teoria sa numele.

În general, conform teoriei relativității speciale, atât distanțele spațiale, cât și cele temporale dintre două evenimente distincte sunt relative la un sistem de referință dat. În acest context, numim „eveniment" ceea ce se întâmplă într-un punct din spațiu-timp. În consecință, lungimea spațială și durata temporală variază în funcție de sistemul de referință adoptat. Această variație este însă minimă pentru sistemele de referință care se mișcă unul față de celălalt cu o viteză constantă mai mică decât viteza luminii.

Orice sistem de referință inerțial poate fi utilizat pentru a măsura distanțele în timp și spațiu; această noțiune de sistem nu necesită un observator, în sensul unui subiect cunoscător. Atunci când se trece de la un sistem de referință inerțial la altul în mișcare rectilinie uniformă față de primul, este necesar să se transforme intervalele de timp și lungimile folosind transformări Lorentz. Spre deosebire de transformările galileene, transformările Lorentz nu mai tratează timpul independent de spațiu: transformarea intervalelor de timp face în schimb apel la spațiu. Acest lucru se datorează faptului că, atunci când se transformă intervale de timp și lungime la trecerea de la un sistem de referință la altul, trebuie să se considere întotdeauna că există o viteză finită și constantă în toate sistemele de referință, și anume viteza luminii. Trecând de la un sistem de referință inerțial *I* la un alt *I'* în mișcare rectilinie uniformă față de *I* în direcția x , este posibil să se scrie transformările Lorentz în felul următor (*x* , *y, z* indică cele trei coordonate spațiale, *t* timpul, *v* viteza și *c* viteza luminii (vezi transformările galileene din capitolul 2):

$$X' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (4.1)$$

Aceste transformări ne permit să definim un interval spațio-temporal cvadridimensional între două evenimente distincte. Acest interval poate fi reprezentat de un invariant, adică un număr care rămâne întotdeauna același, indiferent de sistemul de referință considerat. Din acest motiv, se poate spune că doar distanța spațio-temporală dintre două evenimente nu depinde de alegerea unui sistem de referință. *Prin urmare, spațiul și timpul sunt unite în geometria utilizată de teoria relativității speciale.*

Având în vedere principiul constanței vitezei luminii, razele de lumină ne permit să definim pentru fiecare eveniment e_0 o structură numită „con de lumină", compusă dintr-un con de lumină viitor și un con de lumină trecut.

Interiorul conului de lumină viitor (pe care îl numim pur și simplu „viitor") al unui eveniment dat *este* $_0$ și conține evenimentele care pot

poate fi atins de la e_0 *de* către o particulă care se mișcă cu o viteză mai mică decât viteza luminii. Interiorul conului de lumină trecut (pe care îl numim pur și simplu „trecut") al lui e_0 conține *evenimentele* din care o particulă poate ajunge la e_0 *călătorind* cu o viteză mai mică decât viteza luminii. Toate evenimentele care sunt în viitorul sau trecutul unui eveniment e_0 sunt așa relative față de orice sistem de referință inerțial, deoarece viteza luminii este constantă în toate sistemele de referință. În acest*fel, putem defini pentru orice eveniment dat un trecut și un viitor care sunt relative la acesta și care nu depind de alegerea unui sistem de referință.* Toate evenimentele care se află în conul de lumină al unui eveniment e_0 *sunt separate de* e_0 *printr-un interval spațio-timp asemănător timpului. Nu există* un sistem de referință inerțial față de care orice eveniment din conul de lumină al lui e_0 *să* fie simultan cu e_0 .

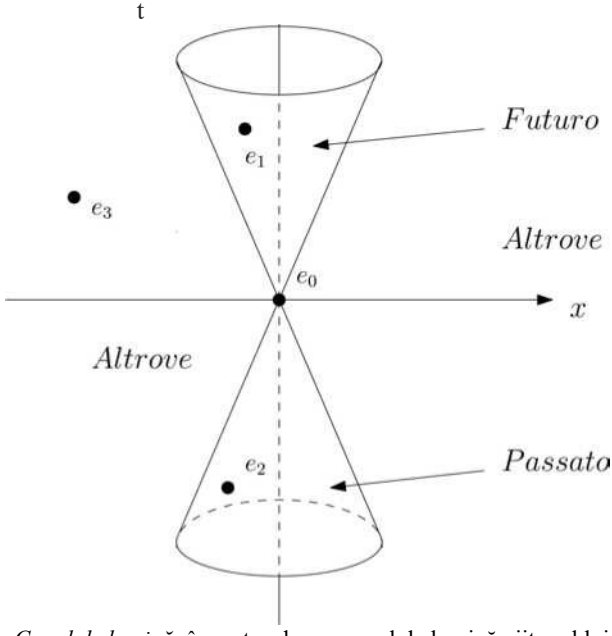


Fig. 4.1 - *Conul de lumină:* în partea de sus conul de lumină viitor al lui e_0 cu un eveniment e_1, în partea de jos conul de lumină trecut, cu un eveniment e 1. „În altă parte" indică evenimente, cum ar fi *și* $_3$, care sunt separate de *și* $_0$ printr-un interval de tip spațiu.

de tip lumină dacă pot fi conectate unul la celălalt printr-o rază de lumină. Acestea sunt evenimentele care constituie marginile conului de lumină al unui anumit eveniment e_0 . Evenimentele care se află în afara conului de lumină al lui e_0 sunt separate *de* acesta printr-un interval spațio-temporal. Nu există o ordine temporală obiectivă între aceste evenimente în raport cu e_0 . Pentru

fiecare pereche de evenimente e_0 și e_3 separate de un interval spațio-temporal, există întotdeauna un cadru de referință inerțial în raport cu care e_0 este înainte de e_3, *un alt cadru* de referință inerțial în raport cu care e_0 *este* după e_3 *și un cadru de referință pentru care cele două evenimente sunt simultane. Aceasta implică faptul că nu există un cadru de referință inerțial în raport cu care cele două evenimente în cauză ocupă același loc. Conul de lumină demonstrează faptul* că nu există o simultaneitate obiectivă, adică una independentă de alegerea unui cadru de referință.

Deși spațiul și timpul sunt unificate în teoria relativității speciale, această teorie nu tratează timpul ca o dimensiune spațială suplimentară. Există o diferență obiectivă între intervalele de tip spațiu și intervalele de tip timp. Relațiile cauzale, în sensul interacțiunilor fizice, pot exista doar între evenimente separate de un interval spațio-temporal de tip timp sau lumină. Dacă există o viteză limită de interacțiune între particule, iar aceasta este viteza luminii, doar evenimentele din conul de lumină trecut al unui anumit eveniment îl pot influența. La rândul său, acest eveniment poate influența doar evenimentele din conul său de lumină viitor. Prin urmare, este suficient să se definească o ordine temporală printre aceste evenimente: ele se află întotdeauna fie în trecut, fie în viitorul evenimentului în cauză, indiferent de cadrul de referință ales. Teoria relativității speciale nu trebuie să definească o ordine temporală printre evenimentele separate de un interval spațio-temporal; prin urmare, abandonează noțiunea unei ordini temporale obiective printre toate evenimentele din univers.

Se poate observa, de asemenea, cum poate fi reconstruită teoria lui Newton pornind de la teoria relativității speciale: dacă viteza luminii ar fi mai mare decât este în realitate, cele două conuri de lumină ale unui eveniment dat s-ar extinde, deoarece viteza maximă de propagare a efectelor ar crește. Dacă această viteză ar fi infinită (interacțiune instantanee), marginile celor două conuri de lumină s-ar întâlni și am redescoperi timpul absolut al lui Newton. Am fi restabilit astfel o ordine temporală și spațială absolută între toate evenimentele din univers, independentă de orice sistem de referință. Toate vitezele ar fi atunci relative și nu ar mai exista o limită a vitezei de propagare a interacțiunilor și nici o constantă valabilă pentru orice sistem de referință ales.

5. TEORIA GENERALĂ A RELATIVITĂȚII

5.1. *Gravitația ca acțiune locală*

În teoria sa a relativității speciale, Einstein (1905) a evidențiat implicațiile conceptului de spațiu și timp, dependente de noțiunea de interacțiune întârziată (între particule), în contrast cu interacțiunea instantanee a lui Newton. Teoria lui Einstein, într-un anumit sens, a moștenit de la electrodinamica lui Maxwell modul de definire și concepere a interacțiunii electromagnetice, deși nu a formulat o teorie a gravitației care să respecte principiul acțiunii locale. În teoria sa a relativității generale, Einstein (1915a și 1915b) a propus o teorie a gravitației și a integrat-o cu cea a relativității speciale, rezolvând astfel problema care reprezenta un conflict între electromagnetism ca interacțiune locală în teoria lui Maxwell și gravitație ca interacțiune instantanee în teoria lui Newton. În loc să formulăm teoria relativității generale în termenii echivalenței (tuturor) sistemelor de referință inerțiale, în acest context vorbim despre o foliere a spațiu-timpului cvadridimensional în hipersuprafețe spațiale tridimensionale ordonate în timp; fiecare foliere corespunzând unei clase de sisteme de referință inerțiale. Prin urmare, teoria relativității generale afirmă că nicio foliare nu este obiectivă sau privilegiată.

În timp ce spațiu-timpul postulat de teoria specială a relativității este plat (precum spațiul tridimensional al fizicii clasice, nerelativiste), în teoria generală a relativității, spațiu-timpul este curbat deoarece masa îi influențează geometria. La rândul său, masa influențează traiectoriile particulelor în spațiu-timp. Întregul (materia și geometria spațiu-timpului) este descris de ecuațiile de câmp ale lui Einstein, care leagă geometria spațiu-timpului (adică metrica sa sub formă de curbură) de distribuția materiei în univers. Prin urmare, și în această teorie, gravitația este o interacțiune locală: o masă dată curbează spațiu-timpul în jurul ei, influențând astfel traiectoriile particulelor care traversează acea regiune a spațiu-timpului (și, prin urmare, o acțiune locală). Dovezile experimentale ale curburii spațiu- timpului constă, în special, în efectul mareic: două particule care se mișcă în paralel pierd progresiv acel paralelism pe măsură ce spațiu-timp se curbează. Acest efect pare a fi un fenomen pur gravitațional, oferind suport empiric pentru concluzia că efectele gravitaționale pot fi reprezentate în termeni de curbură a spațiu-timpului.

Teoria relativității generale este deosebit de importantă pentru cosmologie. Interpretarea predominantă a datelor cosmologice, atât observațională, cât și teoretică, își găsește expresia în modelul cosmologic standard al unui univers în expansiune care își are originea dintr-o singularitate inițială („Big Bang”). Cu toate acestea, acest model nu implică o foliere obiectivă a spațiu-timpului: singularitatea inițială nu este un punct în cadrul acesteia și, prin urmare, nu poate fi descrisă de teoria relativității

generale. Nu este posibil să se definească o ordine temporală unică și obiectivă între toate evenimentele din univers pornind de la această singularitate inițială. Putem defini o foliere privilegiată a spațiu-timpului pentru galaxia noastră (și, prin urmare, pentru noi), dar nu există una privilegiată la nivel global. Chiar dacă vorbim despre timpul cosmic, acesta nu constituie o ordine temporală globală și obiectivă pentru toate evenimentele din univers. Ceea ce afirmă teoria relativității speciale despre relativitatea distanțelor spațiale și temporale dintre evenimentele din spațiu-timp rămâne valabil în cadrul teoriei relativității generale și al aplicării acesteia în cosmologie.

Cel mai important element pentru discuția relației dintre spațiu, timp și materie, oferit de teoria relativității generale, este următorul: mai degrabă decât să fie un fundal pasiv, sistemul de relații spațio-temporale este în sine o entitate dinamică, deoarece relațiile de distanță dintre punctele din spațiu-timp depind de distribuția materiei în univers: o masă plasată într-un punct din spațiu-timp o curbează în jurul ei. Această dinamică a sistemului de relații spațio-temporale înseamnă că nu mai există o distincție clară între spațiu-timp, pe de o parte, și materie, pe de altă parte. Interesant pentru discuția noastră este faptul că teoria relativității generale tratează interacțiunea gravitațională dintre particule în termeni de câmpuri; în acest context, câmpul gravitațional este identic cu câmpul metric care definește geometria spațiu-timpului. Astfel, gravitația este o interacțiune care privește toate particulele, spre deosebire de interacțiunea electromagnetică, care privește doar particulele încărcate. Cu toate acestea, statutul ontologic al câmpului gravitațional este ambiguu: face parte din spațiu-timp sau din materie?

Pe de o parte, metrica cuprinde nu doar curbura spațiu-timpului, ci și întreaga sa geometrie: fără câmpul metric, distanțele spațiu-timp dintre evenimente nu ar putea fi definite; ar exista doar o serie de puncte cu o structură topologică, constituind o varietate diferențială *(varietate diferențială simplă).* Acest lucru susține ipoteza de a considera câmpul metric (și, prin urmare, câmpul gravitațional) ca parte a spațiu-timpului. Pe de altă parte, deoarece gravitația este un tip de interacțiune (afectează mișcarea particulelor), câmpul metric posedă energie, și anume energie gravitațională: interacționează atât cu materia, cât și cu sine însuși. Deși interacțiunea gravitațională este universală (adică afectează toate particulele), ea poate fi considerată o interacțiune la fel ca alte interacțiuni fundamentale (slabe, puternice și electromagnetice). Prin urmare, există și motive întemeiate pentru a argumenta că câmpul metric ar trebui considerat materie sau, mai precis, parte a structurii dinamice care îi determină mișcarea.

5.2. *Substantialismul metric*

Întrucât spațiul și timpul sunt unificate în contextul relativității , este posibil să considerăm spațiu-timpul ca un întreg, ca o substanță auto-existentă. În loc de două entități absolute, spațiu și timp, există o singură entitate, spațiu-timpul absolut. Filosofia contemporană a fizicii ridică întrebarea nu numai dacă spațiu-timpul ca întreg este o substanță, ci și dacă punctele sale sunt astfel, în așa fel încât să existe independent de mărimile fizice instanțiate în ele.

Având în vedere statutul ambiguu al proprietăților metrice, putem concepe două versiuni ale substanțialismului în ceea ce privește spațiu-timpul și punctele sale:

1. O versiune susține că spațiu-timpul fără câmpul metric este o substanță independentă. Cu alte cuvinte, topologia fără metrică este suficientă pentru existența unui spațiu-timp absolut. Pentru punctele din spațiu-timp, această poziție implică faptul că, chiar și cele de pe varietatea diferențiabilă, fără proprietăți metrice, sunt substanțe independente. Fiecare dintre aceste puncte posedă o esență intrinsecă ce constituie identitatea sa, care nu depinde de proprietățile metrice și nici măcar de proprietățile materiale, cum ar fi masa sau sarcina, care există în aceste puncte. Această versiune a substanțialismului, cunoscută sub numele de *substanțialism al varietății , este motivată de natura materială a câmpului metric, care include* energia gravitațională .
2. Cealaltă versiune susține că spațiu-timpul absolut este definit de spațiu-timp cu câmp metric, adică cu structură geometrică gravitațională.[19] [20]Prin urmare, putem caracteriza această versiune drept substanțialism metric. În acest caz, punctele spațio-temporale sunt substanțe doar atunci când sunt considerate împreună cu proprietățile lor metrice: acestea constituie esența punctelor spațio-temporale. Întrucât proprietățile metrice sunt, strict vorbind , relații între puncte (și, prin urmare, nu sunt proprietăți intrinseci), identitatea fiecărui punct spațio-temporal este constituită de relațiile pe care le întreține cu alte puncte (dar numai de relațiile metrice, deoarece identitatea sa este independentă de proprietățile materiale care există în aceste puncte).

La fel ca substanțialismul lui Newton, substanțialismul contemporan trebuie să răspundă unei versiuni relativiste a argumentului lui Leibniz (vezi secțiunea 2.2): un spațiu-timp absolut, independent de materie, ar genera stări distincte, dar indistinguibile. În contextul relativității generale, analogul contemporan al raționamentului lui Leibniz este așa-numitul „argument al găurii". Datând din punct de vedere [21]*istoric încă de la Einstein* , acesta

19 Vezi Earman și Norton, 1987 pentru o prezentare a acestei poziții.
20 Vezi Maudlin, 1989 și Hoefer, 1996.
21 Vezi Einstein și Grossmann, 1913, pp. 260-261.

implică din nou transformări care lasă relațiile fizice neschimbate, dar care, conform teoriei absolutiste a spațiu-timpului, induc o diferență la nivelul punctelor spațiu-timp. Acest argument exploatează faptul că descrierea geometrică a spațiu-timpului sub forma unui câmp metric definit pe o varietate diferențiabilă este invariabilă sub anumite transformări, numite difeomorfisme.

Să luăm în considerare în particular o transformare definită prin (a) o transformare identitate aplicată doar unei *porțiuni* a spațiu-timpului - să zicem, întregului spațiu-timp, cu excepția unei regiuni („gaura") - și (b) o transformare „reală" asupra *restului* spațiu-timpului („gaura"), astfel încât, după această transformare, diferite puncte din gaură să posede magnitudini de câmp, fără nicio diferență la nivelul câmpurilor. Acum, conform teoriei relativității generale, câmpurile și imaginea lor obținută prin această transformare descriu aceeași situație fizică. Totuși, dacă susținem că punctele spațiu-timp posedă o existență independentă de câmpuri (și de valorile câmpurilor în aceste puncte), rezultă că acest tip de transformare implică o distincție care nu este verificabilă fizic: diferitele puncte ale spațiu-timpului absolut sunt, prin urmare, purtători ai valorilor fizice ale câmpurilor în cauză, conectate prin transformarea descrisă mai sus.

Concluzia la care se ajunge prin acest argument este mai puternică decât cea a lui Leibniz. Teoria relativității generale este o teorie deterministă, dar cei care susțin că punctele spațio-temporale sunt substanțe independente de câmpuri trebuie totuși să admită o formă de indeterminism: starea unui model al relativității generale într-o regiune arbitrar de mare a spațiu-timpului nu determină în mod unic acel model pentru tot spațiu-timpul. Cu alte cuvinte, având în vedere o anumită foliere a spațiu-timpului în hipersuprafețe tridimensionale, întreaga istorie a universului până la un anumit timp, în contextul acelei folieri, nu determină evoluția istoriei universului din acel moment încolo. Astfel, două modele de spațiu-timp cu aceeași foliere temporală și limitate de transformarea menționată anterior sunt identice până la un anumit timp (în acea foliere), după care va fi imposibil să se determine care evoluție, adică care model, va fi privilegiat. (Printr-un model al relativității generale, înțelegem aici un spațiu-timp și toate obiectele sale geometrice și fizice, iar acest lucru trebuie evident să satisfacă ecuațiile de câmp ale lui Einstein.)

Argumentul găurii conduce astfel la următoarea concluzie: dacă, pe baza substanțialismului în raport cu spațiu-timpul, recunoaștem situații fizic indistinguibile ca fiind cu adevărat distincte, acest lucru implică o consecință inacceptabilă pentru teoria relativității generale. Ar deveni, de fapt, o teorie indeterministă, ale cărei ecuații nu ar putea determina evoluția unui model spațiu-timp. Cu toate acestea, această întărire a argumentului lui Leibniz are un preț: argumentul găurii se aplică doar unei teorii a spațiu-timpului absolut,

conform căreia punctele acelui spațiu-timp sunt substanțe a căror identitate este independentă de mărimile metrice pe care le posedă. Cu alte cuvinte, argumentul găurii este o obiecție concludentă la prima versiune a substanțialismului menționată mai sus. Acest argument, însă, nu privește a doua versiune, conform căreia proprietățile metrice sunt proprietăți caracteristice punctelor spațiu-timp.

Într-adevăr, substanțialismul metric este întărit de teoria relativității generale. Un argument important în favoarea sa îl reprezintă așa-numitele *soluții goale* ale ecuațiilor de câmp ale lui Einstein: există soluții la aceste ecuații care nu admit materie, adică soluții în care tensorul energie-impuls care reprezintă materia este zero. În soluțiile goale, există câmpul metric, dar nu și materia. Ne putem întreba în mod firesc dacă soluțiile goale reprezintă posibilități fizice reale (și nu sunt doar un surplus de structură matematică; vezi discuția despre configurațiile simetrice din secțiunea 2.3). Cu toate acestea, aceste soluții arată că câmpul metrico-gravitațional este autonom în sensul că nu depinde de existența în univers a particulelor care posedă masă, ceea ce ar constitui originea (sursa) sa.

În electrodinamică, putem folosi noțiunea de câmp electromagnetic liber și dacă intenționăm să calculăm influența unui astfel de câmp asupra mișcării unei anumite particule încărcate, ignorând sursele acesteia, care pot fi chiar situate într-o regiune îndepărtată a fostului său con de lumină. Cu toate acestea, nu există niciun motiv să nu credem că acest câmp a fost determinat de particulele încărcate care i-ar constitui sursa.

În teoria relativității generale, aceeași idee reapare sub denumirea de *principiul lui Mach,* care afirmă că distribuția masei în univers determină metrica spațiu-timp. Acest principiu, însă, nu este valabil în relativitatea generală, în sensul că distribuția masei singură ar determina metrica spațiu-timp. Se dovedește a fi valid doar într-un sens limitat: dată fiind o metrică inițială, distribuția masei determină evoluția acestei metrici, în sensul curburii sale. Cu toate acestea, existența soluțiilor vii arată că nimic nu împiedică metrica inițială să fie curbată, fără ca această curbură să depindă de prezența masei la originea sa. În general, este clar că distribuția materiei nu poate determina relațiile spațiale sau spatiotemporale dintre obiectele materiale: însăși ideea unei distribuții a materiei presupune, de fapt, relații de distanță dintre obiectele materiale. Prin urmare, relațiile spațiu-timp apar nu numai în tensorul metric, ci și în tensorul energie-impuls [22]. Ceea ce întărește statutul metricilor în teoria generală a relativității este faptul că gravitația este unificată cu metricile.

Dacă includem câmpul metric în ontologia noastră, găsim cele două posibilități discutate în secțiunea 4.2 referitoare la câmpul electromagnetic .

22 Vezi Lehmkuhl, 2011.

La prima vedere, s-ar putea argumenta că valorile câmpului metric în puncte din spațiu-timp sunt proprietăți ale acestor puncte. În acest caz, acestea ar fi considerate substanțe care stau la baza câmpului metric, deoarece posedă proprietăți matematice.

(exprimat prin tensorul metric) [23]. O altă posibilitate este de a argumenta că câmpurile, inclusiv cel metric, sunt un fel de materie primă sui generis. Această poziție înlocuiește particulele cu câmpuri și, în consecință, există un singur tip de materie.

În contextul teoriei relativității generale, această poziție este cunoscută ca un fel de relaționalism în raport cu spațiu- timpul [24]. Conform acestei poziții, există un plen de câmpuri, mai degrabă decât relații de distanță între punctele materiei. Ne-am putea întreba, totuși, dacă această concepție merită caracterizarea drept relaționalism, deoarece nu mai există o divergență principială față de substanțialism. Ambele, de fapt, admit câmpul metric în ontologie și, prin urmare, acceptă o structură geometrică bogată ca fapt ontologic primitiv. Pentru această versiune a relaționalismului, este un câmp al materiei ca oricare altul, în timp ce substanțialistul îi acordă un statut privilegiat , considerându-l o constituentă a spațiu-timpului pe care sunt apoi definite câmpuri ale materiei, cum ar fi, de exemplu, câmpul electromagnetic.

23 Vezi Field, 1980 și 1985.

24 Vezi în special Rovelli, 1997 și Dieks, 2001, secțiunea 6; Pooley, 2001 și Pooley, 2013, secțiunea 7, pentru o discuție filosofică.

6. FIZICĂ ȘI ONTOLOGIE RELATIVISTĂ

6.1. *Super-substanțialism*

Geometrizarea gravitației în teoria relativității generale ne permite să propunem un substanțialism mai radical în raport cu spațiu-timpul decât cel tradițional, care ia forma unui dualism între spațiu-timp și materie, în care aceasta din urmă este constituită din particule sau câmpuri, inserate într-un spațiu-timp care există independent de ele. O poziție și mai radicală ar consta în afirmarea faptului că spațiu-timpul este în realitate *singura* substanță existentă și, prin urmare, materia ar fi redusă la o proprietate a acesteia. În - literatura contemporană, această poziție este cunoscută sub numele de *suprasubstanțialism ; este imună atât la argumentul lui Leibniz (vezi secțiunea* [2.2]), cât și la argumentul găurii (vezi secțiunea 5.2): aceste argumente, de fapt, exploatează ideea că relațiile dintre obiectele materiale rămân neschimbate, în timp ce punctele spațiu-timp în care se află obiectele materiale (sau o parte a acestora) se schimbă. Cu toate acestea, dacă materia este constituită din proprietăți ale punctelor spațiu-timp, nu o putem considera neschimbată prin schimbarea punctelor spațiu-timp care posedă aceste proprietăți.

Putem urmări conceptul care identifică materia cu extensia spațio-temporală până la Descartes. Întrucât el caracterizează materia drept extensie spațială și întrucât aceasta este esența obiectelor materiale, putem propune o lectură a lui Descartes care afirmă identitatea dintre materie și spațiu.[25] [26]Olandezul Baruch Spinoza (1632-1677), care pornește de la sistemul filosofic cartezian, apără această concepție cel mai explicit în *Etica sa* (1677) - care este mai presus de toate un tratat de metafizică -, unde își dezvoltă teoria referitoare la fizică - în special, în scoliumul propoziției 15. El presupune că există o singură substanță, în sensul unei singure entități a cărei existență nu depinde de altele. Spinoza, în plus, susține că conceptele de fizic, material și extins au același sens și aceeași extensie semantică. Interesant este

25 Vezi Sklar, 1974, pp. 221-224.

26 Vezi în special *Principiile filosofiei* , partea a doua, §§ 4, 10-12. Susținătorii acestei interpretări a lui Descartes sunt Hesse (1961, p. 103) și Hartz (1989, pp. 23-24); vezi în schimb în special Woolhouse (1994, pp. 30-33) pentru o opinie contrară acesteia.

că o aluzie la această concepție poate fi găsită și în manuscrisul lui Newton , *Despre Gravitație* (probabil scris între 1665 și 1670) [27].

Filosoful contemporan Jonathan Bennett detaliază interpretarea lui Spinoza asupra identificării substanței fizice cu spațiul în cartea sa *„Un studiu asupra eticii lui Spinoza”* (1984) [28]. Potrivit lui Bennett, toate propozițiile care se referă la obiecte din spațiu sunt reductibile la propoziții care se referă la regiuni ale spațiului și care le atribuie proprietăți fizice. Bennett își rezumă interpretarea lui Spinoza astfel:

> Această poziție sugerează că există o singură substanță, spațiul în ansamblu, ale cărei regiuni primesc calități multiple, cum ar fi impenetrabilitatea, masa și așa mai departe, astfel încât orice propoziție care afirmă existența unui corp este reductibilă la o propoziție care exprimă ceva despre o regiune a spațiului (Bennett, 1984, § 22.1, trad. de T. Ferrando).

Totuși, proprietățile fizice ale regiunilor spațiale nu sunt identice cu proprietățile atribuite obiectelor pe care le găsim în aceste regiuni. Prin urmare, Bennett adaugă un asterisc (*) la conceptele proprietăților regiunilor spațiale. El scrie:

> A spune că o baltă este vâscoasă este echivalent cu a spune că o anumită regiune a spațiului este vâscoasă*, adică posedă proprietatea specifică regiunilor pe care o conceptualizăm atunci când spunem că există lucruri vâscoase. Iar a spune că există o regiune vâscoasă* este echivalent cu a spune că *spațiul este local vâscos** (ibid., § 23.5, trad. de T. Ferrando).

A reduce materia la spațiu înseamnă, așadar, a reconstrui proprietățile pe care le atribuim obiectelor care o populează pe baza proprietăților aparținând punctelor sau regiunilor spațiului în care acestea se află.

Conform acestei perspective, materia este identică cu spațiul [29]. Punctele sau regiunile spațiului constituie materia și nu doar entitățile fizice de bază, ci și singurele obiecte din lumea fizică care posedă proprietăți fizice, toate acestea fiind proprietăți ale punctelor sau regiunilor spațiale. Deținerea de proprietăți fizice conferă spațiului o structură internă. Această structură, la rândul ei, este constituită din diferitele proprietăți fizice (sau diferitele valori ale acestor proprietăți) pe care spațiul le posedă în diferite regiuni.

Rețineți că această concepție nu poate fi reconstruită prin postularea spațiului gol și adăugarea ulterioară a materiei (în sensul că spațiul dobândește proprietăți fizice): nu există o distincție ontologică între spațiu și materie. Nu există spațiu fără proprietăți fizice și, prin urmare, nu există spațiu gol.

---

27 Vezi definiția cuvântului corp.

28 Vezi Bennett, 1984, cap. 4. Pentru o interpretare contrară, vezi în special Curley, 1988, cap. 1.

29 Vezi și Clifford, 1876.

Totuși, ideea de a reduce toate proprietățile fizice la proprietățile punctelor sau regiunilor spațiale se confruntă cu două obiecții finale:

1. Această concepție nu poate explica ce proprietăți fizice ale punctelor din spațiu putem reduce la proprietățile fizice tradiționale pe care le atribuim obiectelor situate în spațiu. Spinoza (și interpretarea lui Bennett) nu oferă argumente pentru a răspunde la această întrebare. Această poziție se prezintă ca o ontologie a fizicii, spre deosebire de o simplă redescriere lingvistică, care necesită utilizarea adjectivelor în loc de substantive pentru a descrie conținutul spațiului, dar nu rezolvă nicio problemă ontologică. De exemplu, nu se elimină scaunele din ontologie spunând: „Această regiune a spațiului este asemănătoare unui scaun" în loc de „există un scaun în această regiune a spațiului". Pentru a susține suprasubstanțialismul, este necesar să se indice proprietăți care sunt autentice spațiului și la care pot fi reduse toate proprietățile fizice [30].
2. Suprasubstanțialismul nu poate explica mișcarea . De exemplu, se poate muta un scaun (sau orice obiect sau particulă) dintr-o regiune a spațiului în alta. Scaunul rămâne în mod clar același, dar regiunea în care se află se schimbă; dacă ar fi o proprietate a regiunii spațiului în care se află la un anumit moment, acest lucru ar duce la concluzia absurdă că nu este același în timp; diferite regiuni ale spațiului ar fi dobândit succesiv proprietatea de a fi „scaune", astfel încât de fiecare dată ar fi vorba de o apariție diferită a acestei proprietăți.

Dacă trecem de la spațiul tridimensional al fizicii newtoniene la spațiu-timpul cvadridimensional al fizicii relativiste, putem aborda a doua obiecție. Scaunul (și, mai general, orice obiect material) poate fi considerat conținutul (sau chiar proprietatea) unei regiuni a *spațiu-timpului* și putem încerca să reconstruim mișcarea și schimbarea acesteia pe această bază. Mai mult, dacă luăm ca model teoria gravitației propusă în contextul relativității generale, putem aborda și prima obiecție.

6.2. *Geometrodinamică*

Proiectul de identificare a materiei cu spațiu-timpul primește un nou impuls în cadrul teoriei generale a relativității, deoarece se poate argumenta că, în acest cadru, o proprietate materială (gravitația) poate fi redusă la o proprietate geometrică a spațiu-timpului. Luând ca punct de plecare geometrizarea gravitației, putem propune să demonstrăm că *toate* proprietățile materiale sunt, de fapt, identice cu proprietățile geometrice.

Există un program concret de fizică care se îndreaptă în această direcție:

30 Vezi Sklar, 1974, pp. 166-167, 222-223.

geometrodinamica, concepută de John A. Wheeler la sfârșitul anilor 1950. Acest program își propune să construiască fizica prin recunoașterea spațiu-timpul ca unică substanță. Punctul său de plecare este interpretarea teoriei relativității generale ca o reducere a teoriei gravitației la o descriere geometrică a spațiu-timpului (în mod specific, curbura sa). Pe această bază, geometrodinamica lui Wheeler are în vedere, de asemenea, reducerea electrodinamicii și a fizicii particulelor elementare la o descriere geometrică a spațiu-timpului, fără a recunoaște existența altor obiecte fizice (cum ar fi particulele sau câmpurile prezente în spațiu-timp, dar distincte de acesta). Wheeler scrie:

> Este spațiu-timpul doar o arenă în care câmpurile și particulele se mișcă ca entități „fizice" și „extraterestre"? Sau este continuumul cvadridimensional tot ce există? Poate fi o geometrie curbată, goală, un fel de element magic capabil să constituie fiecare element al lumii fizice: (1) o ușoară curbură într-o regiune a spațiului descrie un câmp gravitațional; (2) o geometrie ondulată cu un alt tip de curbură descrie un câmp electromagnetic în alta; (3) o regiune înnodată cu curbură mare descrie o concentrație de sarcină și masă-energie care se mișcă ca o particulă? Sunt câmpurile și particulele entități încorporate *în* geometrie sau nu sunt altceva decât geometrie ? (1962b, p. 361) [31].

Prin urmare, ipoteza este că lumea fizică este identică cu continuumul spațio-temporal cvadridimensional și cu proprietățile sale geometrice, cum ar fi curbura. Particulele și câmpurile nu ar fi entități suplimentare spațiu-timpului și existente *în acesta,* ci spațiu-timpul însuși înzestrat cu anumite proprietăți geometrice. Această concepție rezolvă problema (1) menționată la sfârșitul secțiunii anterioare: proprietățile geometrice pot fi, fără îndoială, considerate proprietăți autentice ale spațiu-timpului.

Cu toate acestea, programul ambițios al lui Wheeler a eșuat, deoarece următoarele probleme nu au fost rezolvate.

1. *Și electrodinamica:* s-a demonstrat cu mai multe contraexemple că descrierea geometrică propusă de geometrodinamică nu ne permite să distingem în contextul electrodinamicii între condiții inițiale fizice *diferite* și bine definite [32].
2. *Singularități:* Geometrodinamica a dorit să evite singularitățile [33]. Această încercare a eșuat, deoarece ecuațiile referitoare la structura geometrică a spațiu-timpului nu li se aplică. Prin urmare, dacă singularități există, există ceva ce teoria care ar trebui să descrie structura geometrică a spațiu-

31 Pentru o expunere detaliată, vezi Wheeler, 1962a, în special pp. **XI - XII** , 8-87, 129-130, 225-236. Cf. și Graves, 1971, cap. 4 și 5, în special pp. 236, 312-318.

32 Vezi Misner, 1974, pp. 12-14.

33 Wheeler, 1962a, în special pp. 25-31, 45-66.

timpului nu poate gestiona.[34] [35].

3. *Particule elementare:* Particulele elementare care alcătuiesc materia sunt fermionii (adică particule cu spin pe jumătate întreg), cum ar fi electronii. Aceste particule, însă, nu pot fi tratate în cadrul geometrodinamicii [11].

Ca răspuns la a treia problemă, în special, Wheeler a abandonat geometrodinamica ca program de reconstrucție a fizicii doar din spațiu-timp în 1973. [36]Pe scurt, putem oricând apăra supersubstanțialismul ca proiect metafizic, dar nu este clar cum poate fi compatibil acest proiect cu fizica particulelor elementare [37].

6.3. *Fizica relativistă și metafizica timpului*

Deși programul de reducere a fizicii la geometria spațiu-timpului a eșuat, fizica relativistă propune fuziunea spațiului și timpului într-un spațiu-timp cvadridimensional, cu o geometrie determinată de conuri de lumină definite în fiecare punct (vezi Capitolul 4). Cu toate acestea, ideea de a unifica spațiul și timpul în cadrul spațiu-timpului cvadridimensional pare paradoxală. În timp ce spațiul și timpul sunt ambele omogene (adică niciun punct din spațiu sau timp nu este privilegiat), timpul este diferit de spațiu deoarece nu este izotrop: are o direcție privilegiată, curgând din trecut spre viitor, în timp ce în cazul spațiului nu există o direcție privilegiată. Dacă considerăm timpul ca fiind unit cu spațiul într-un spațiu-timp cvadridimensional, direcția și tranziția sa sunt abandonate ca caracteristici globale ale universului.

Unificarea spațiului și timpului într-un spațiu-timp cvadridimensional a avut un impact semnificativ asupra filosofiei timpului. Conform unei concepții despre existență care pare a fi apropiată de bunul simț, există doar ceea ce este prezent. Ceea ce este viitor nu există încă, iar ceea ce este trecut nu mai există. Această concepție este cunoscută sub numele de *presentism.* Mai general, conform acestei concepții, ceea ce există depinde de timp, în sensul că există doar ceea ce este prezent la un moment dat. În acest context, putem afirma că există doar ceea ce este prezent, dar totuși, admițând ca existente în acest context atât ceea ce este prezent, cât și ceea ce este trecut. Această viziune asupra existenței presupune o teorie a timpului concepută ca un flux din trecut spre viitor (trecerea timpului): un moment viitor se apropie din ce în ce mai mult de prezent, devine prezent, apoi trecut și apoi tot mai departe de acesta. În consecință, modurile timpului (trecut, prezent și viitor)

34 Vezi Stachel, 1974, pp. 33-39.
35 Vezi ibid., pp. 45-46.
36 Vezi Misner, Thorne și Wheeler 1973, § 44.3-4, în special p. 1205.
37 Vezi Lehmkuhl, 2016, pentru o evaluare contemporană.

sunt modurile sale obiective. Urmând clasificarea lui McTaggart (1908), această concepție despre timp este numită acum teoria A a timpului. Este, ca să spunem așa, o teorie dinamică a timpului *(teoria tensionată a timpului).*

În contrast cu această viziune asupra timpului și existenței, există o alta, conform căreia existența nu depinde de timp. Dimpotrivă, tot ce există în timp pur și simplu există. Tot ce există în lumea fizică există la un moment dat (și ocupă un anumit spațiu), dar asta nu înseamnă că există doar ceea ce este acolo la un moment dat. Putem caracteriza această viziune drept o teorie a - existenței fără zeci de grade . Această poziție este cunoscută și sub numele de *eternism,* deoarece existența nu depinde de un anumit timp; este compatibilă cu teoria dinamică a timpului (teoria A). Pe baza acestei teorii, putem spune că trecutul și viitorul există la fel de mult ca și prezentul.

Totuși, această concepție a existenței este mai apropiată de o altă teorie a timpului, pe care o numim acum teoria B, urmându-l din nou pe McTaggart (1908). Conform acestei teorii, între momentele de timp sau evenimentele în timp există doar relațiile „a fi înainte" (mai devreme), „a fi după" (mai târziu) și „a fi simultan". Dar nu există niciun moment de timp care să poată fi descris obiectiv ca prezent. În consecință, nu există un flux de timp din trecut spre viitor prin prezent. Prin urmare, modalitățile timpului nu sunt obiective. Prin urmare, putem considera teoria B ca fiind o teorie statică a timpului.

Putem rezuma relațiile logice dintre aceste teorii după cum urmează: (1) Teoria dinamică a existenței implică teoria dinamică a timpului. (2) Cea din urmă nu o implică însă pe prima. Prin urmare - din (1) -, teoria statică a timpului implică teoria statică a existenței. Dar - din (2) -, teoria statică a existenței nu implică teoria statică a timpului.

Noțiunile de moduri ale timpului, adică noțiunile de prezent, viitor și trecut, nu sunt utilizate în științele naturii în general. Cu toate acestea, teoria relativității speciale ridică o obiecție la adresa teoriei dinamice a timpului și a existenței. Conform relativității speciale , de fapt, nu există un prezent obiectiv, deoarece nu există simultaneitate absolută. Ceea ce este prezent este relativ la un sistem de referință dat și nu există un sistem privilegiat. Ceea ce este prezent (simultan) în raport cu un sistem de referință dat poate aparține trecutului unui alt sistem de referință sau viitorului unui al treilea observator. Întrucât nu există un prezent obiectiv, nu există moduri obiective ale timpului. În limbajul relativității speciale, adjectivul „prezent" („acum") are același statut ca și adverbul „aici": ambele indică poziția subiectului vorbitor în spațiu-timp cvadridimensional. Întrucât nu există un „aici" obiectiv, nu există un „prezent" obiectiv. Numai dacă alegem arbitrar un punct în spațiu-timp ca „prezent" există un viitor și un trecut obiective relativ la acest punct, definite de conul său de lumină [38].

38 Despre această consecință, vezi Putnam, 1967; Stein, 1968, în special pp. 15 și

6.4. *Blocul Fizica și metafizica universului*

Viziunea statică asupra timpului și existenței aplicată spațiu -timpului cvadridimensional al fizicii relativității este cunoscută sub numele de *metafizică a universului-bloc.* În acest context, universul este conceput ca un singur bloc format din totalitatea spațiu-timpului cu tot conținutul său; adică, tot ceea ce se află în spațiu-timp pur și simplu există și constituie conținutul acestui univers-bloc.

Mai precis, dacă acceptăm principiile constanței vitezei luminii și echivalența tuturor sistemelor de referință inerțiale, rămâne de ales între solipsism și eternalism. În acest context, conform solipsismului, există doar punctul din spațiu-timp în care mă aflu acum: întrucât simultaneitatea obiectivă nu există în cadrul relativității, prezentismul se reduce la poziția că există doar punctul prezent din spațiu-timp (ceea ce este „aici" și „acum"). Acum, fiecare punct din spațiu-timp poate pretinde că este „aici" și „acum". Dacă vrem să evităm concluzia absurdă că punctul în care mă aflu acum este privilegiat obiectiv, fiind singurul „aici" și „acum" adevărat (solipsism), trebuie să afirmăm că *toate* punctele din spațiu-timp există pur și simplu cu tot conținutul lor fizic (eternalism). Nu există nicio poziție intermediară [39]. Dacă, de exemplu, am presupune că există atât trecutul, cât și prezentul (trecutul, în acest context, este definit de conul de lumină care trece prin punctul de referință), am ajunge la următoarea concluzie paradoxală: în momentul în care un eveniment viitor (în conul de lumină viitor al punctului de referință) devine real, o parte din „altul loc" devine la fel de reală, dar aparține trecutului fără a fi fost vreodată în viitorul sau prezentul punctului de referință (vezi figura din capitolul 4.3). Prin urmare, singura poziție cu adevărat justificabilă, bazată pe cele două principii ale teoriei speciale a relativității care sunt reținute în teoria generală a relativității, este că tot ce se află în spațiu-timpul cvadridimensional pur și simplu există.

Care este conținutul universului bloc? În metafizică, este obișnuit să se facă distincția între categoriile de *substanță* și *proces.* În acest context , noțiunea de substanță se referă la un obiect fizic care persistă în întregime pentru un anumit timp sau pentru eternitate. O substanță nu are părți temporale, ci doar părți spațiale (cu excepția cazului în care este indivizibilă, ca în cazul particulelor elementare). Un proces, pe de altă parte, este un obiect fizic care are părți spațiale și temporale și este alcătuit din evenimente, în sensul a ceea ce se întâmplă în puncte din spațiu- timp. Un proces este o serie

18, și 1991, în special p. 159; Dorato, 1995, cap. 11–13, în special pp. 186–187, 210; Sider, 2001, cap. 2.4; și Saunders, 2002. Acești autori susțin teze diferite (Stein se opune lui Putnam), dar sunt de acord în recunoașterea acestei consecințe.

39 Vezi Stein, 1968 și 1991; Saunders, 2002.

continuă de evenimente care sunt legate între ele prin intervale spațio-temporale asemănătoare timpului. Prin urmare, evenimentele sunt părțile fundamentale ale proceselor. Sunt obiecte fizice care persistă pentru un anumit timp și sunt compuse din evenimente. Se spune că substanțele *rezistă* (adică continuă să existe în întregime pentru un anumit timp sau pentru eternitate), în timp ce procesele se spune *că persistă* (adică durează un anumit timp și nu există un moment în care să existe complet; au părți temporale și spațiale) - *endure* și *perdure,* în engleză [40].

În cadrul universului bloc, se poate concepe fiecare obiect material ca o secvență spațio-temporală de evenimente similare, numite evenimente geneidentice [41]. Se folosesc termeni precum „linie de univers" sau „vierme spațio-temporal". O piatră, de exemplu, pe care o considerăm în mod obișnuit o substanță complet persistentă în timp, este în realitate, conform acestei concepții, o serie continuă de evenimente spațio-temporale - adică o serie continuă de puncte sau regiuni ale spațiului-timp în care există proprietățile fizice care constituie piatra. Mulți filozofi, începând cu Bertrand Russell (1872–1970) și Willard Van Orman Quine (1908–2000), cred că fizica relativității pledează în favoarea unei metafizici a evenimentelor și proceselor [42].

Ceea ce se întâmplă într-un punct sau o regiune a spațiu-timpului — proprietățile fizice existente în acel punct sau regiune — este determinat o dată pentru totdeauna și, prin urmare, imuabil, la fel ca universul în ansamblu. Totuși, în acest context, este posibil să propunem următoarea reconstrucție a ceea ce considerăm de obicei mișcarea unui obiect prin spațiu și timp: să luăm în considerare o secvență continuă de puncte sau regiuni ale spațiu-timpului; aceste puncte sunt separate de intervale spațio-timp de tip timp; evenimente similare au loc în aceste puncte. Această secvență poate fi considerată fie ca o linie a universului, fie ca o regiune mai extinsă în spațiu-timp. Ceea ce este de obicei considerat mișcarea unui obiect prin spațiu este de fapt o secvență continuă de puncte sau regiuni ale spațiu-timpului care posedă un conținut fizic similar.

Totuși, trebuie luată în considerare următoarea obiecție: dacă înlocuim particulele punctuale cu evenimente punctuale (care formează linii continue) și, de asemenea, înlocuim geometria tridimensională cu una cvadridimensională pentru a reprezenta relațiile dintre evenimente, obținem o *variație* în configurația evenimentelor din universul bloc, dar nu *o*

40 Vezi Lewis, 1986b, p. 202

41 Pentru o elaborare a acestei poziții, vezi Heller, 1990; Sider, 2001; Benovsky, 2006, partea întâi; și Balashov, 2010. Despre noțiunea de identitate genică, vezi Carnap, 1928, §§ 128 și 159; și Reichenbach, 1956, p. 38.

42 Vezi Russell, 1969, cap. 14; și Quine, 1960, § 36.

schimbare.

Totuși, deoarece aceste relații există împreună, nu există nicio schimbare. Numai dacă împărțim universul bloc în hipersuprafețe tridimensionale și le comparăm putem defini schimbarea - care s-ar referi la diferențele dintre aceste hipersuprafețe. Aceste substituții, însă, nu afectează ontologia, deoarece aceasta constă din blocul cvadridimensional [43].

Această obiecție, însă, ignoră faptul că fizica relativistă și metafizica universului bloc nu tratează timpul ca o dimensiune suplimentară a spațiului. Punctele de pe fiecare linie de univers sunt ordonate conform criteriului de a fi înainte sau după, această ordine fiind unică și având o direcție. Acest lucru este implicat și de teoria B a timpului. În consecință, există un timp local pentru fiecare obiect (linie de univers), dar nu un timp global. Prin compararea diferitelor puncte de pe fiecare linie de univers, putem introduce noțiunea de schimbare, în termenii diferenței dintre ele, ținând cont că, pentru a face acest lucru, trebuie să presupunem o ordine temporală ca fapt primitiv, care există independent de schimbare.

Deși se poate include schimbarea în universul bloc în acest fel , nu există nicio modalitate de a introduce devenirea temporală , deoarece nu există evenimente care să devină reale în timp. Totul în lumea fizică există atemporal și, prin urmare, viitorul meu există la fel ca trecutul meu. Se poate încerca să se conceapă o noțiune relativistă de devenire temporală care să o înlocuiască pe cea obișnuită [44], dar aceste încercări nu pot schimba faptul că, conform viziunii universului bloc, nimic nu poate începe să existe sau să devină real. După cum a spus matematicianul și fizicianul Hermann Weyl (1885–1955):

> Lumea obiectivă pur și simplu există: nu se *întâmplă.* Numai privirii conștiinței mele, care se mișcă de-a lungul liniei de univers ce reprezintă viața corpului meu, se poate prezenta o secțiune a acestui univers ca o imagine plutitoare în spațiu și care se schimbă continuu în timp. (Weyl, 1949, p. 140)

În concluzie, nu este clar dacă metafizica universului bloc poate include o concepție a schimbării care să satisfacă experiența noastră despre lume.

6.5. *Relaționalismul leibnizian în fizica relativistă*

Relaționalismul leibnizian se confruntă cu două probleme în contextul fizicii relativiste, în special în relativitatea generală: relațiile de distanță dintre punctele materiei sunt înlocuite de relații spațio-temporale dintre evenimente, iar acestea par a fi mărimi de câmp mai degrabă decât particule. Astfel,

43 Geach, 1965, în special p. 365, este referința clasică pentru această obiecție.

44 Vezi Dorato, 1995, cap. 11-13; Dieks, 2006; Harrington, 2008.

relaționalismul dezvoltat în contextul relativității generale este un relaționalism de câmp care include în special câmpul metric și, prin urmare, se apropie de substanțialismul despre spațiu-timp (vezi capitolul 5), spre deosebire de relaționalismul leibnizian, care include relații de distanță ce individualizează puncte materiale (vezi secțiunea 2.2).

Totuși, un leibnizian ar putea obiecta la relaționalismul de câmp. În relativitatea generală (ca în orice altă teorie a câmpului), câmpurile sunt studiate pornind de la mișcarea particulelor. Nu există dovezi directe pentru existența acestor entități, deoarece toate dovezile experimentale sunt prezentate sub formă de poziții și schimbări de poziție ale obiectelor discrete. Astfel, toate determinările empirice ale câmpului gravitațional constau în observații ale mișcării corpurilor, în sensul schimbărilor în relațiile spațiale dintre ele. Chiar și în cazul fenomenelor pur gravitaționale, cum ar fi singularitățile spațiu-timp sau undele gravitaționale, tot ce este observabil este schimbarea relațiilor de distanță dintre obiectele materiale. După cum a spus Einstein:

> Câmpul gravitațional se manifestă în mișcarea corpurilor. Prin urmare , problema determinării mișcării acestor corpuri doar pe baza ecuațiilor câmpului este de o importanță fundamentală (Einstein și Infeld, 1949, p. 209, trad. de T. Ferrando).

Având în vedere această situație, este posibil și în fizica relativistă să se considere câmpurile (inclusiv cel metric) ca parte a structurii dinamice a teoriei, mai degrabă decât să se considere că aparțin ontologiei primitive. Din acest punct de vedere, geometrizarea dinamicii, sau geometria devenind dinamică, confirmă pur și simplu poziția conform căreia geometria spațiu-timpului și parametrii dinamici formează un pachet care are sarcina de a oferi o descriere simplă și informativă a distanțelor în schimbare dintre obiectele fizice.

Faptul că particulele nu apar în ecuațiile de câmp ale relativității generale nu înseamnă că particulele nu există, ci că, la scara la care este utilizată relativitatea generală, se poate abstrage descrierea fundamentală a materiei în termeni de particule punctuale și o se poate înlocui cu o descriere robustă în termeni de câmpuri, cum ar fi un fluid incompresibil sau „praf cosmic".

În mod similar, faptul că structura dinamică a teoriei relativității generale nu relevă relații de distanță instantanee între particule nu înseamnă că nu există o configurație a punctelor materiale identificate prin astfel de relații. Pe baza acestei ontologii, rămâne o întrebare deschisă dacă structura dinamică care descrie cel mai bine schimbarea acestor relații, realizând cel mai bun echilibru între simplitate și conținut informațional, este formulată în termeni de interacțiuni instantanee între particule (ca în mecanica newtoniană) sau în

termeni de interacțiuni întârziate (sau chiar anticipate), ca în fizica relativistă.[45] [46]În plus, la fel ca în cazul mecanicii neotoniene , este la fel de posibil să se formuleze o versiune relaționalistă a relativității generale, cu configurații spațiale instantanee în structura dinamică, cum ar fi, de exemplu, teoria lui Barbour22 .

Argumentul în favoarea acestui relaționalism leibnizian este parcimonia sa ontologică. Spre deosebire de metafizica universului bloc, această ontologie presupune doar o condiție de spațialitate minimă (adică, ca relațiile de distanță admise ca primitive să satisfacă inegalitatea triunghiului; vezi capitolul 2). În special, această ontologie nu presupune nicio condiție metrică în raport cu timpul (cum ar fi intervale spațio-temporale bine definite între punctele evenimentelor din universul bloc). Presupunând schimbarea acestor relații de distanță ca fapt primitiv, această ontologie este empiric solidă în sensul că nu are nicio problemă în a integra devenirea temporală și trecerea timpului pe baza acestei schimbări. În concluzie, diferitele poziții care pot fi adoptate în raport cu fizica relativistă confirmă încă o dată că ontologia este o chestiune filosofică. Nu este fixată de structura geometrică și dinamică propusă de o teorie fizică, oricare ar fi aceasta.

45 Vezi Vassallo și Esfeld, 2016.

46 Vezi capitolul 2.3 și Barbour, 2012; Gomes și Koslowski, 2013; și Gryb și Thébault, 2016 pentru o evaluare filosofică.

7. NONLOCALITATEA CUANTICĂ

7.1. Experimentul mental al lui Einstein din 1927

În timpul conferinței Solvay de la Bruxelles din 1927, Albert Einstein a propus un „experiment mental" *(Gedankenexperiment)* menit să demonstreze clar dificultățile de interpretare a conținutului fizic al mecanicii cuantice. Mai jos este prezentată o versiune a acestui experiment formulată de Louis de Broglie (1892-1987) și publicată în 1959, deoarece este mai ușor accesibilă:

> în considerare o particulă închisă într-o cutie *B* ai cărei pereți sunt impenetrabili . Să presupunem că prin orice procedură, de exemplu prin introducerea unui panou dublu prin cutia *B* , reușim să o împărțim în două părți izolate *B1 și* B2 *, care* sunt ulterior transportate în două locuri foarte îndepărtate, cum ar fi Parisul și Tokyo. [...] Particula rămâne apoi potențial prezentă în totalitatea cutiilor B1 și B2 , *iar funcția* sa *de undă* este compusă din două ramuri, dintre care „T1" este situată în *B1* , iar „T2 " în B2 . [...] Legile probabilității mecanicii undelor ne spun că, dacă efectuăm un experiment, la Paris, pe cutia *B1,* care ne permite să detectăm prezența particulei în interiorul acesteia, probabilitatea de a obține un rezultat pozitiv este I C_1 I 2, în timp ce cea de a obține unul negativ este I C_2 I 2 . Conform interpretării obișnuite, aceasta ar avea următorul înțeles: întrucât particula era „potențial" prezentă în ambele cutii înainte de experimentul de localizare, aceasta s-ar localiza brusc în cutia B_1 din Paris în cazul unui rezultat pozitiv și s-ar localiza brusc în cutia B_2 din Tokyo în cazul unui rezultat negativ (de Broglie, 1959, pp. 963-964, trad. de A. Oldofredi).

Mecanica cuantică reprezintă sistemele fizice – cum ar fi particula din acest experiment mental – printr-o funcție de undă ^, care se dezvoltă conform unei ecuații liniare și deterministe, și anume ecuația Schrödinger. Această evoluție duce la faptul că sistemele fizice pot fi reprezentate în termeni de suprapunere între diferitele poziții din spațiul fizic în care acestea pot fi localizate – în exemplul nostru, înainte de experimentul de localizare, există o suprapunere a poziției particulei în caseta *B1* și *B2* . Sensul operațional al unei suprapuneri este că este posibil să se calculeze probabilitățile exacte de a găsi particula într-unul *dintre termenii suprapunerii,* folosind o regulă introdusă de Max Born (1882–1970) conform căreia, prin pătratul modulului (valoarea absolută) a funcției de undă ^ , sunt definite probabilitățile rezultatelor măsurătorilor. În cazul nostru, există o

probabilitate de 50% de a găsi particula în caseta *B1* la Paris și o probabilitate de 50% de a o găsi în caseta *B2* la Tokyo. Totuși, liniaritatea ecuației Schrödinger împiedică această suprapunere de stări să reprezinte faptul că, după măsurare, particula se află fie în cutia *B1 din* Paris, fie în cutia *B2 din Tokyo*. Acesta este motivul pentru care în mecanica cuantică se postulează că, în momentul în care se efectuează o măsurare, evoluția funcției de undă conform ecuației Schrödinger este suspendată și că T „se prăbușește" într-unul dintre termenii suprapunerii.

Paradoxul pe care Einstein a încercat să-l evidențieze prin experimentul său *Gedanken* este următorul: să presupunem că deschidem cutia din Paris și o găsim goală. În consecință, acțiunea (locală) de deschidere a cutiei *B1 (* din Paris) are ca efect imediat o modificare (locală) în cutia *B2* din Tokyo, deoarece particula se găsește exact în această cutie. Înainte de a deschide *B1, particula nu se găsește nici în cutia din Paris, nici în* cea din Tokyo. Acesta este motivul pentru care Einstein a folosit ulterior expresia „efect fantomă la distanță"[47]: o observație într-un anumit loc (în acest caz Paris) poate avea ca efect imediat o schimbare într-un altul, separat de primul de orice distanță (în acest caz distanța dintre Paris și Tokyo). Werner Heisenberg (1901-1976), colaborator al lui Niels Bohr (1885-1962) și unul dintre fondatorii mecanicii cuantice, este de acord cu această consecință. El răspunde experimentului mental al lui Einstein astfel:

> [...] este ușor de înțeles că această acțiune se propagă cu o viteză mai mare decât cea a luminii. Este însă destul de evident că o astfel de propagare a influenței nu poate fi deloc utilizată pentru a transmite un semnal cu o viteză mai mare decât cea a luminii, astfel încât comportamentul pachetului de unde raportat aici nu este în niciun fel contradictoriu cu postulatul fundamental al teoriei relativității (Heisenberg, 1976, p. 51).

Colapsul funcției de undă nu poate fi folosit pentru a trimite semnale care se propagă mai repede decât viteza luminii, deoarece rezultatul unui astfel de colaps nu poate fi controlat. În cazul nostru, cele două rezultate posibile (găsirea particulei în caseta *B1* ***sau B2)*** *sunt* la fel de *probabile*. Totuși, aceasta nu înseamnă că nu există un conflict cu teoria relativității (atât specială, cât și generală): aceste teorii nu vorbesc despre posibilitatea sau imposibilitatea trimiterii de semnale la o anumită viteză, ci mai degrabă plasează tot ceea ce poate influența ceea ce se întâmplă într-un anumit punct din spațiu-timp în interiorul conului său de lumină trecut (sau al conului său de lumină viitor, dar niciodată în afara structurii definite de conul de lumină; vezi Capitolul 4). Acum, în cazul nostru, există o influență între evenimente separate de un -interval asemănător spațiului. Tocmai aceasta este nonlocalitatea cuantică

47 Într-o scrisoare către Max Born, nr. 84 din 3 martie 1947, la p. 186 a ediției italiene menționate anterior; în germană *spukhafte Fernwirkungen* (Born și Einstein, 1969, p. 215); în traducerea în engleză se citește *acțiune înfricoșătoare la distanță* (Born și Einstein, 1971, p. 158).

care îl îngrijorează pe Einstein, deoarece intră în conflict clar cu teoriile sale despre relativitate.

La fel ca Einstein, de Broglie consideră această consecință inacceptabilă și trage următoarea concluzie din experimentul mental al lui Einstein:

> Singura interpretare rezonabilă mi se pare aceasta: particula se afla deja în una dintre cele două cutii *B1 sau B2 înainte* de *experimentul* de localizare, dar nu știm în care, iar probabilitățile luate în considerare de mecanica ondulatorie obișnuită - reflectă această ignoranță; dacă o detectăm în cutia *B1* este pentru că se afla deja în această cutie, dacă nu o putem găsi, atunci este localizată în *B2* . Totul devine clar deoarece revenim la interpretarea clasică a probabilității, unde aceasta este o consecință a ignoranței noastre. Dar din momentul în care admitem această perspectivă, se pare că descrierea particulei prin intermediul funcției de undă ^, deși conduce la o reprezentare perfect exactă a probabilităților , nu ne oferă o descriere completă a realității fizice, deoarece particula trebuie să aibă o poziție înainte de experimentul care o dezvăluie, iar funcția de undă nu ne spune nimic despre ea (de Broglie, 1959, p. 964, trad. de A. Oldofredi).

Astfel, concluzionăm din aceasta că mecanica cuantică este incompletă, deoarece ne oferă doar probabilitățile de a găsi particule dacă sunt observate, dar nu descrie nici pozițiile lor reale, nici traiectoriile lor. Afirmarea că particulele nu sunt localizate precis în spațiul fizic (și, prin urmare, nu urmează traiectorii definite) duce la consecința absurdă de a fi nevoite să admitem efecte fantomă la distanță atunci când le măsurăm pozițiile. Indiferent dacă se acceptă sau nu raționamentul lui Einstein și de Broglie, experimentul mental pe care l-am discutat conturează următoarea problemă: fie mecanica cuantică în formularea sa standard este incompletă, fie implică ceea ce Einstein a numit „efecte fantomă la distanță [48]". Cu alte cuvinte, acest *experiment* evidențiază două probleme: problema *nonlocalității* (se pare că operațiile la o locație bine definită pot influența imediat ceea ce se întâmplă la o distanță arbitrar de mare în spațiu) și *problema măsurării* (se pare că operația de măsurare creează o realitate fizică care nu există independent de aceasta).

7.2. Argumentul din 1935 al lui Einstein, Podolsky și Rosen

Într-o lucrare publicată în 1935 împreună cu colaboratorii săi Boris Podolsky și Nathan Rosen (cunoscut ulterior sub acronimul EPR, de la inițialele celor trei autori), Einstein a extins și reformulat experimentul mental din 1927 propunând un caz care implică două particule: au considerat pozițiile și vitezele a două particule emise simultan de aceeași sursă, care ulterior s-au îndepărtat în direcții spațiale opuse, astfel încât distanța care le

48 Vezi Norsen, 2005.

separă a crescut treptat. Spre deosebire de mecanica clasică, în cazul cuantic, în virtutea relațiilor de incertitudine ale lui Heisenberg, particulele nu pot avea valori determinate simultan pentru poziția și viteza lor, ceea ce înseamnă că nu este posibil să se măsoare valorile acestor observabile simultan și cu o precizie arbitrară.

, în exemplul considerat de EPR, teoria cuantică afirmă că, dacă am alege să măsurăm poziția uneia dintre cele două particule, am obține un rezultat determinat, la fel ca și cum am măsura poziția celeilalte; același rezultat este valabil dacă am decide să măsurăm vitezele acestor obiecte. Totuși, dacă mecanica cuantică exclude atribuirea simultană a unei poziții și viteze determinate particulelor cuantice , s-ar putea concluziona că interacțiunea locală cu una dintre aceste două particule (alegerea variabilei de măsurat și obținerea rezultatului măsurării) poate influența ceea ce se întâmplă într-o interacțiune locală cu cealaltă particulă, indiferent de distanța spațială sau spațio-temporală care le separă. Încă o dată, acest experiment mental ne prezintă următoarea dilemă: fie mecanica cuantică este incompletă, deoarece nu dezvăluie valorile poziției și vitezei pe care obiectele cuantice le posedă independent de procesele de măsurare, fie implică prezența unor „acțiuni fantomă la distanță", deoarece o interacțiune locală de măsurare asupra uneia dintre cele două particule influențează proprietățile celeilalte particule, indiferent de distanța dintre aceste două obiecte.

În 1951, fizicianul american David Bohm (1917-1992) a propus un experiment mental de tip EPR care se pretează la o analiză matematică mult mai puțin complicată. În acest caz, în loc să ia în considerare poziția și viteza a două particule, Bohm se concentrează pe spinul lor. Spinul este un parametru care contribuie la impulsul cinetic al unui sistem cuantic și apare doar în cadrul dinamic al fizicii cuantice, fiind o mărime absentă în contextul fizicii clasice. În natură, există sisteme cuantice cu spin pe jumătate întreg (fermioni), cum ar fi electronii. În acest caz, spinul poate lua doar două valori bine determinate în fiecare direcție spațială , și anume „spin pozitiv" și „spin negativ". Ceea ce este adevărat pentru variabilele de poziție și viteză din exemplul lui Einstein, Podolsky și Rosen este valabil și pentru spinul în direcția x (spin x) , direcția y (spin y) ***și*** direcția z (spin z) : conform mecanicii cuantice, dacă o particulă are o valoare de spin determinată într-o anumită direcție, ea nu are valori de spin determinate pentru această mărime în nicio altă direcție.

Bohm (1951, pp. 611-622) își imaginează, așadar, o situație în care două particule cu spin semi-întreg sunt emise simultan din aceeași sursă și se îndepărtează în direcții spațiale opuse, astfel încât distanța spațială dintre ele crește treptat. Dacă se alege măsurarea spinului x al uneia dintre particule și se obține o valoare specifică ca urmare a măsurătorii, rezultatul unei observări a aceleiași mărimi (spin x) asupra celeilalte particule va indica invariabil valoarea opusă celei obținute în prima măsurare; acest lucru

rămâne valabil dacă se alege măsurarea spinului în *direcția y sau z.* Acum, dacă mecanica cuantică exclude faptul că o particulă are o valoare definită a spinului *x* și a spinului *y* și a spinului *z* , atunci se pare că interacțiunea locală cu una dintre cele două particule poate influența evenimentele care au loc într-o interacțiune locală cu cealaltă particulă, independent de distanța spațială sau spațio-temporală dintre cele două particule.

Matematic, în acest caz avem de-a face cu o suprapunere antisimetrică de corelații („prima particulă cu spin pozitiv și a doua particulă cu spin negativ" minus „prima particulă cu spin negativ și a doua particulă cu spin pozitiv"). Putem scrie această stare astfel:

^12 = ^('*'1'® ^2 - »^2) (7.1)

În această expresie, ^ 12 reprezintă starea de spin total, adică starea de spin a celor două particule, reprezentate respectiv de ^ 1 și ^ 2 , semnul „+” reprezintă valoarea pozitivă a spinului, iar semnul „—” reprezintă valoarea negativă a spinului. Semnul 0 indică produsul tensorial dintre stările de spin posibile ale celor două particule; în (7.1) ^ 12 indică o stare cunoscută sub numele de „stare singlet” în care parametrul total de spin are o valoare nulă (zero). ^ 12 este o stare pură, în timp ce niciuna dintre cele două particule care o compun nu se află într-o stare pură, neavând o valoare de spin determinată în nicio direcție. În acest caz, vorbim nu doar despre o suprapunere a diferitelor valori posibile ale unui parametru (în acest caz, o suprapunere între spinul pozitiv și spinul negativ), ci și despre o înspăimântare a stărilor a două sau mai multe obiecte. Starea acestor două particule este exprimată printr-o singură funcție de undă ^ 12 care stabilește o corelație între posibilele valori de spin ale celor două particule: dacă una dintre ele adoptă o anumită valoare de spin într-o direcție, cealaltă particulă va adopta invariabil valoarea de spin opusă în aceeași direcție. Acum, achiziția unei anumite valori de spin are loc în momentul în care se efectuează un proces de măsurare, deci avem din nou de-a face cu reducerea funcției de undă, adică cu colapsul acesteia într-unul dintre cei doi termeni ai suprapunerii [49]:

$$\text{^12 = 4'1' 8 ^2} \tag{7.2}$$

$$\text{q/ 12 = vpp ®} \tag{7.3}$$

Încă o dată, ne întrebăm cum să interpretăm colapsul funcției de undă în timpul unui proces de măsurare. Dacă este vorba de ceva *epistemic* (adică o actualizare a informațiilor disponibile observatorului), rezultă că mecanica cuantică este incompletă, deoarece sistemul se află întotdeauna fie în starea (7.2), fie în starea (7.3), dar teoria nu are informații despre starea reală a sistemului. Dacă este vorba de ceva *ontologic,* consecința este să acceptăm că în teoria cuantică există ceea ce Einstein a numit „acțiuni fantomă la distanță”, deoarece actul de a efectua o măsurare asupra uneia dintre cele două particule are consecința că *ambele* dobândesc o valoare de spin determinată în direcția măsurată, indiferent de distanța care le separă.

49 În capitolul următor vom discuta în detaliu fenomenul colapsului funcției de undă.

7.3. Teorema lui Bell din 1964

John S. Bell (1928–1990), matematician și fizician la CERN din Geneva, s-a întrebat dacă ar fi posibilă finalizarea mecanicii cuantice așa cum a propus-o Einstein, adică evitând „acțiunile fantomă la distanță" discutate în acest capitol. Pentru a răspunde la această întrebare, el a demonstrat o teoremă al cărei rezultat stabilește că nicio teorie fizică a variabilelor ascunse în care principiul localității este valabil nu este capabilă să reproducă predicțiile statistice ale mecanicii cuantice. În această afirmație a teoremei lui Bell, trebuie să interpretăm termenul „predicții statistice" în sensul unor distribuții probabilistice pe o serie de măsurători în anumite condiții : Bell a reușit să demonstreze că ipotezele argumentului EPR, și anume cea a realismului local - conform căruia obiectele cuantice posedă proprietăți independent de observarea lor - și a localității, impun restricții care sunt încălcate *empiric* de teoria cuantică. Cu toate acestea, având în vedere succesul său empiric extraordinar, se concluzionează din teorema lui Bell că finalizarea sa cu variabile ascunse locale nu este posibilă [50].

Să revenim la experimentul mental al lui Bohm și să luăm în considerare două particule cu spin semi-întreg emise simultan de aceeași sursă, precum și două evenimente de măsurare a spinului într-o direcție dată efectuate asupra fiecăreia dintre cele două particule; aceste evenimente de măsurare sunt separate de un interval asemănător spațiului (vezi Figura 4.1). Fie *A și B* cele două evenimente de măsurare în regiunile spațio-temporale 1 și 2 , fie *a* și *b* cei doi parametri de spin măsurați asupra celor două particule și fie *A* o specificație completă , conform teoriei luate în considerare, a tot ceea ce există (a variabilelor ascunse) într-o regiune spațio-temporală 3a și 3b , care este situată în conul de lumină trecut al celor două evenimente *A* și *B* și care, prin urmare, poate influența rezultatele acestora (vezi Figura 7.1).

Pornind de aici, Bell folosește următoarea ipoteză de localitate pentru a-și demonstra teorema: dată fiind specificarea lui X în regiunea 3a , *b* și *B* nu contribuie la determinarea a ceea ce se întâmplă în regiunea 1 unde se află *A*. De asemenea, dată fiind specificarea lui X în regiunea 3b , *a* și A nu contribuie la determinarea a ceea ce se întâmplă în regiunea 2 unde se află

50 Bell, 1964, retipărit în Bell, 2010, pp. 20–30.

B.

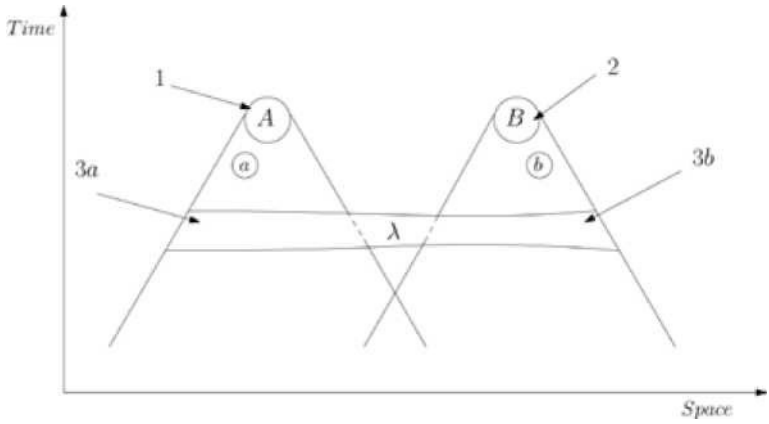


Fig. 7.1 - Diagramma spazio-temporale della situazione considerata da Bell nella prova del suo teorema.
Immagine adattata da Seevinck (2010, appendice)

Formal, putem scrie această condiție de localitate după cum urmează:

$$P(A|a, b, B, X) = P(A|a, A)$$
$$P(B|a, b, A, X) = P(B|b, A) \quad (7.4)$$

În această formulă, P (•!•) reprezintă probabilitatea condiționată de a obține un anumit rezultat al măsurătorii de spin A sau B ($A = \pm 1$, $B = \pm 1$). Această formulă stipulează că rezultatul măsurătorii A depinde doar de a și X, dar este independent atât de b , cât și de B : date fiind b și B , probabilitatea obținerii lui A nu se modifică și invers.

Din (7.4) putem deriva o condiție, cunoscută sub numele de factorizabilitate , care poate fi scrisă după cum urmează:

$$P(A \mid B|a, b, A) = P(A|a, A) \times P(B|b, A) \quad \textbf{(7,5)}$$

Dat fiind X, ecuația (7.4) ne spune că probabilitatea rezultatului unei măsurători asupra particulei din regiunea 1 depinde exclusiv de variabila măsurată asupra acelei particule; în mod similar, acest rezultat este valabil și pentru măsurarea asupra particulei din regiunea 2. Aceste fapte sunt exprimate spunând că probabilitatea conjuncției celor două rezultate poate fi *inclusă* în probabilitățile rezultatelor (unice) respective, pe baza definiției evenimentelor independente din teoria probabilităților. Pe scurt, ecuația (7.5) indică faptul că probabilitățile care apar în partea dreaptă a egalității sunt independente una de cealaltă. Pentru aceasta

Din acest motiv, această ecuație descrie și un sistem total clasic, cum ar fi de exemplu aruncarea a două monede (cele două particule): probabilitatea de a obține ca rezultat conjuncția „cap" și „cap" este dată de produsul probabilităților acestor două evenimente (care sunt independente una de cealaltă): 0,5 x 0,5 = 0,25.

Pe lângă premisa localității (7.4), pentru a-și demonstra teorema, Bell folosește o altă premisă care poate fi caracterizată drept „ condiția de independență": alegerea parametrilor care urmează să fie măsurați, *a* și *b,* este independentă de X; cu alte cuvinte, X nu influențează aceste alegeri. Condiția de independență este o cerință generală pentru orice experiment științific: dacă alegerile parametrilor care urmează să fie măsurați într-un sistem nu ar fi independente de starea sa trecută, experimentul nu ar fi o modalitate fiabilă de a obține informații despre sistemul în cauză. În aceste cazuri, vorbim și despre condiția de non-conspirație, prin care starea trecută a sistemului nu poate exercita nicio influență asupra parametrilor care urmează să fie măsurați. Această premisă nu spune nimic despre liberul arbitru al experimentatorilor, deoarece parametrii care urmează să fie măsurați pot fi aleși de o mașină; exclude doar faptul că X îi determină într-un fel *pe a* și *b* .

Teorema lui Bell afirmă că nicio teorie fizică care satisface condițiile de localitate și independență nu poate reproduce predicțiile statistice ale mecanicii cuantice; această afirmație este verificabilă experimental. Toate experimentele care vizează confirmarea sau infirmarea acestei teoreme sunt cunoscute sub numele de „experimente Bell", chiar dacă Bell însuși nu a participat niciodată direct la experimente care au avansat în această direcție. Majoritatea acestor experimente au următoarea configurație: două particule cu spin pe jumătate întreg (mai precis, doi fotoni care se comportă, în această situație, ca particule cu spin pe jumătate întreg) sunt emiși simultan de aceeași sursă și se îndepărtează una de cealaltă în direcții opuse. Variabilele de spin care urmează să fie măsurate pe cele două particule sunt determinate. Compararea rezultatelor măsurătorilor confirmă predicțiile teoriei cuantice. Cu toate acestea, rezultatele măsurătorilor ar arăta corelații mai puternice decât ar fi posibil dacă ar fi fost îndeplinite condițiile de localitate și independență.

Experimentele efectuate de grupul lui Alain Aspect la începutul anilor 1980 la Paris (Aspect, Dalibard și Roger, 1982) sunt deosebit de semnificative. Parametrii de spin care urmează să fie măsurați în aceste experimente sunt fixați numai după emisia celor două particule de la sursă, iar cele două măsurători sunt separate una de cealaltă printr-un interval spațio-temporal de tip spațial. Aceasta exclude orice posibilitate de a trimite un semnal care să transmită unei particule informații despre variabila care urmează să fie măsurată sau rezultatul măsurătorii către cealaltă, dat fiind că viteza de propagare a oricărui semnal are o limită superioară a vitezei luminii

(diverse experimente au fost efectuate după cele ale lui Aspect) [51].

Întrucât premisa independenței este o cerință generală pentru toate experimentele științifice, premisa pusă sub semnul întrebării de teorema lui Bell și demonstrațiile sale experimentale este cea a localității (7.4). Mecanica cuantică încalcă această condiție și, în consecință, contrazice și condiția de factorizabilitate (7.5): dacă rezultatul măsurării unei observabile pe una dintre cele două particule în urma unei măsurători este cunoscut, atunci probabilitățile rezultatului măsurării aceleiași observabile pe cealaltă particulă se schimbă. În cazul spinului deja considerat, rezultatele spinului pozitiv și al spinului negativ nu sunt echiprobabile, un rezultat fiind mai probabil decât celălalt. Pentru a demonstra acest lucru într-un experiment care implică doar două particule cu spin semi-întreg, trebuie luate în considerare corelațiile statistice care se obțin atunci când există un anumit unghi între direcțiile de spin măsurate pe ambele particule.

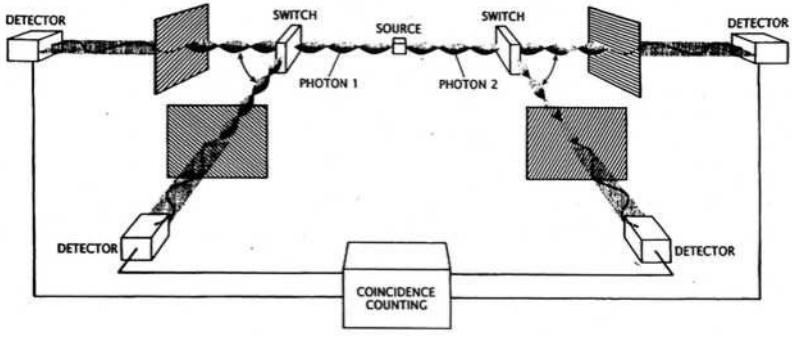


Fig. 7.2 - Schema unui experiment Bell cu doi fotoni emiși simultan de la o sursă comună; magnitudinea spinului este măsurată de un detector. Selecția parametrilor care urmează a fi măsurați și observarea propriu-zisă a fotonilor au loc în regiuni spațiale separate de un interval asemănător spațiului.

Prin urmare, vorbim despre nonlocalitate cuantică: probabilitățile rezultatelor măsurătorilor în anumite puncte din spațiu-timp nu sunt complet determinate de ceea ce se întâmplă în conurile lor de lumină din trecut; evenimentele situate în puncte din spațiu-timp separate de aceste regiuni printr-un interval asemănător spațiului ajută la determinarea probabilităților a ceea ce se întâmplă în aceste puncte [52].

Cu alte cuvinte, având în vedere situația descrisă în Figura 7.1, este posibil să se conceapă o situație **S** (sau o lume posibilă) care este identică cu aceasta în raport cu conul de lumină trecut al evenimentului de măsurare la *A* (sau *B*)

51 În acest sens, se remarcă în special Tittel *și colab.* , 1998.

52 Cf. Maudlin, 2011, cap. 1-6.

, astfel încât și în această lume posibilă vom avea același con de lumină trecut pentru *A* ; totuși, în **S** , să ne imaginăm că există o diferență în conul de lumină trecut al lui *B* (sau *A* **)** . Aceasta poate fi cauza unei diferențe în probabilitățile rezultatului unei observații la *A* **(** *sau B* **)** [53]. Prin urmare, nu este posibil să se suplimenteze mecanica cuantică cu parametri suplimentari (cunoscuți și sub numele de variabile ascunse) care sunt locali, adică respectă principiul localității (7.4). Datorită teoremei lui Bell și experimentelor menționate mai sus, trebuie, așadar, să încercăm să facem inteligibilă non-localitatea cuantică, mai degrabă decât să vorbim pur și simplu despre „acțiuni fantomă la distanță".

8. FUNCȚIA DE UNDĂ CUANTICĂ ȘI PROBLEMA MĂSURĂRII

8.1. *Principiile separabilității și acțiunii locale*

Einstein își rezumă filosofia despre natură în articolul *Mecanica cuantică și realitate* (1948) astfel:

> [...] este caracteristic obiectelor fizice să fie concepute ca fiind aranjate într-un continuum spațio-temporal; în această aranjare, pare esențial ca, la un moment dat, obiectele considerate de fizică să revendice o singură existență autonomă, fiind „situate în regiuni distincte ale spațiului". Fără ipoteza unei astfel de existențe autonome (a unei „ființe-așa") a obiectelor individuale separate spațial - o ipoteză care provine în primul rând din reflecția cotidiană - gândirea fizică în sensul obișnuit nu ar fi posibilă; nici nu este clar cum ar putea fi formulate și verificate legile fizicii fără o distincție clară de acest fel. Teoria câmpului a dus acest principiu la consecințele sale extreme, localizând în elementele spațiale infinitezimale (cvadridimensionale) atât obiectele elementare - existente independent unele de altele - care formează baza teoriei, cât și legile elementare postulate pentru aceasta.
>
> Caracteristic independenței reciproce dintre două obiecte separate spațial **(** *A* și *B* **)** este următorul principiu, aplicat în mod constant doar în teoria câmpurilor: o influență externă exercitată asupra lui *A* nu are nicio influență directă asupra *lui B.* Renunțarea radicală la acest „principiu al contiguității " ar face imposibilă ideea existenței sistemelor (cvasi) închise și, prin urmare, enunțarea legilor verificabile empiric în sensul cu care suntem obișnuiți (Born și Einstein, 2015, p. 201).

În această reflecție, Einstein se bazează pe teorii de câmp, cum ar fi

53 Cf. ivi, pp. 118-127.

electrodinamica lui Maxwell și propria sa teorie a gravitației, teoria relativității generale. Conform acestor teorii, toată existența este localizată în puncte din spațiu-timp, astfel încât, dacă oricare două obiecte fizice sunt separate spațial, atunci parametrii atribuiți oricăruia dintre cele două obiecte sunt independenți de cei aplicați celuilalt. Cu alte cuvinte, putem atribui fiecăruia dintre aceste obiecte o descriere a stării sale, independent de cea a celuilalt. Prin urmare , starea sistemului total compus din aceste două obiecte este pur și simplu dată de conjuncția (suma, produsul) stărilor individuale ale celor două obiecte. Aceasta este, în esență, ceea ce *afirmă principiul separabilității.* Principiul *acțiunii locale,* pe de altă parte, prevede că interacțiunile dintre obiectele fizice se propagă de la un punct din spațiu la altul și, în consecință, sunt transmise cu o viteză finită (adică, mai lentă sau egală cu viteza luminii, dar niciodată mai rapidă).

Acum, în fizica cuantică, parametrul dinamic al câmpului clasic este înlocuit de funcția de undă, care este ea însăși un câmp. Cu toate acestea, spre deosebire de câmpurile clasice, funcția de undă nu este definită în spațiul fizic în trei sau patru dimensiuni (spațio-timp), ci în spațiul de configurație. Dacă luăm în considerare *N* particule, spațiul de configurație are 3N dimensiuni , adică o dimensiune pentru poziția fiecărei particule în fiecare dintre cele trei coordonate ale spațiului fizic. Dacă, de exemplu, luăm în considerare o configurație de trei particule, spațiul de configurație va avea nouă dimensiuni. Prin urmare, fiecare punct din spațiul de configurație reprezintă o posibilă configurație a particulelor în spațiul fizic. Acesta este motivul pentru care teoria cuantică este o teorie neclasică: parametrul de câmp pe care îl utilizează nu este definit în spațiul fizic.

Întrucât parametrul dinamic central al fizicii cuantice este un câmp definit în spațiul configurației, starea pe care acest obiect o atribuie sistemelor fizice descrie *întreaga* configurație a particulelor considerate (rezultă că, pentru întreaga configurație a particulelor care alcătuiesc universul nostru, funcția de undă este, prin urmare, o funcție de undă universală). În general, nu este posibil să se separe această stare în componentele individuale care ar fi atribuite fiecărei particule individuale. Pe scurt, motivul pentru care formalismul mecanicii cuantice abandonează principiul separabilității al lui Einstein este că folosește un parametru dinamic al câmpului definit în spațiul configurației, nu în spațiul fizic.

Toți ceilalți parametri dinamici (inclusiv masa și sarcina), în plus, sunt situați la nivelul funcției de undă, iar în fizica cuantică nu putem considera acești parametri ca reprezentând proprietăți locale sau intrinseci ale particulelor. De exemplu, chiar dacă luăm în considerare doar o particulă cuantică cu o funcție de undă care indică o suprapunere de posibile locații sau traiectorii (ca în experimentul mental al lui Einstein din 1927 descris în capitolul anterior), efectele masei sau sarcinii particulei în cauză pot fi, în

principiu, testate

pe toate locațiile sau traiectoriile sale posibile.1 În spațiul de configurație , funcția [de] undă urmează o evoluție care corespunde cu cea a unui câmp local, o evoluție descrisă de ecuația Schrödinger (să lăsăm deoparte postulatul colapsului funcției de undă pentru moment):

$$ih\frac{d'H}{dt} = H < i > \quad (8.1)$$

În această ecuație diferențială, operatorul *H,* numit Hamiltonian, reprezintă energia totală a obiectului sau configurației obiectelor în argumentul funcției de undă și - constanta lui Planck împărțită la 2^. Ecuația (8.1) descrie astfel evoluția temporală a funcției de undă în spațiul configurației și nu evoluția pozițiilor sau vitezelor particulelor în spațiul fizic - așa cum fac legile lui Newton sau Lorentz. Cu alte cuvinte, deoarece funcția de undă se aplică punctelor din spațiul configurației, legea care descrie evoluția sa reprezintă evoluția întregii configurații și nu cea a particulelor individuale. Este evident, prin urmare, că ecuația Schrodinger stabilește o *corelație* între evoluția dinamică a tuturor particulelor care constituie o configurație dată. Pe scurt, *încălcarea principiului separabilității implică și o încălcare a principiului* acțiunii locale.[54 55].

Din aceasta, este posibil să înțelegem și cele două caracteristici care disting nonlocalitatea cuantică de acțiunea la distanță în fizica newtoniană. În primul rând, nonlocalitatea cuantică este independentă de distanța spațială dintre particule, în timp ce gravitația newtoniană scade în funcție de pătratul distanței lor - vezi în special ecuația (1.3). Acest lucru se explică prin faptul că funcția de undă este definită în spațiul configurației: se aplică unei configurații de particule indiferent de distanța care le separă. În al doilea rând, nonlocalitatea cuantică este selectivă: corelațiile EPR nu se aplică tuturor particulelor în mod nediscriminatoriu, așa cum se întâmplă în schimb cu gravitația, ci numai celor aflate într-o stare încurcată. Fizica cuantică este, ca să spunem așa, discriminatorie; nu există o încurcarere „totul cu totul", așa cum ar susține unele prezentări populare și inexacte ale holismului cuantic.

În citatul de deschidere al acestui capitol, Einstein subliniază ferm importanța principiilor separabilității și acțiunii locale: el afirmă că fără primele, „gândirea fizică în sensul nostru obișnuit nu ar fi posibilă; nici nu este clar cum ar putea fi formulate și verificate legile fizicii fără o distincție clară de acest fel". În ceea ce privește cele din urmă, el afirmă că „eliminarea completă a acestui principiu ar face imposibilă ideea existenței sistemelor

54 Cf. Brown *și colab.* , 1995, 1996; și Esfeld *și colab.* , 2017.

55 Cf. Henson, 2013 și Esfeld, 2017 vs. Howard, 1985 și 1989.

(cvasi) închise și formularea unor legi care pot fi verificate prin experiență în sensul cu care suntem familiarizați". Într-adevăr, dacă aceste două principii nu ar fi valide, nu am putea izola obiectele fizice și obține informații despre ele prin experimente (la urma urmei, întregul univers nu este un obiect care poate fi manipulat prin experiența științifică). Aceste observații confirmă, însă, doar că nu are sens să vorbim despre o inseparabilitate universală. Chiar dacă starea configurației particulelor întregului univers este inseparabilă, teoria trebuie să permită descrierea subsistemelor sale, a căror evoluție este aproape independentă de restul mediului. Mai precis, consecințele dezastruoase despre care vorbește Einstein ar rezulta dintr-o eliminare *completă* a principiilor acțiunii locale și separabilității și, prin urmare, chiar și în cadrul lui Einstein, rămâne deschisă posibilitatea ca o teorie să abandoneze aceste principii fără a pune sub semnul întrebării posibilitatea testării legilor fizicii prin efectuarea de experimente pe sisteme aproape izolate de restul universului.

În această secțiune, am văzut (i) cum încălcarea principiilor separabilității și acțiunii locale este ancorată în formalismul mecanicii cuantice și (ii) că această încălcare este o consecință a faptului că această teorie înlocuiește un parametru de câmp obișnuit definit în spațiul fizic cu unul (funcția de undă) definit în spațiul de configurație. Cu toate acestea, această înlocuire ridică întrebarea cum funcția de undă și legea care determină evoluția sa în spațiul de configurație (ecuația Schrödinger) sunt legate de realitatea fizică. Această întrebare ridică o problemă cunoscută sub numele de „problema măsurării".

8.2. *Problema măsurării*

Problema de măsurare constă din următoarele trei propoziții [56].

1. Funcția de undă oferă o descriere completă a obiectelor cuantice, adică o descriere care colectează toate proprietățile posedate de un anumit obiect la un moment dat.

2. Funcția de undă evoluează în timp conform ecuației lui Schrödinger, care este liniară și deterministă.
3. Când se efectuează o măsurare, se obține un singur rezultat bine definit. Dacă, de exemplu, măsurăm spinul unui electron într-o anumită direcție, obținem un rezultat exprimat printr-o poziție specifică a acului pe dispozitivul de măsurare; acul se poate afla doar în două stări specifice: o poziție care indică „spin pozitiv" sau o poziție care indică „spin negativ".

La prima vedere, avem motive întemeiate să acceptăm fiecare dintre aceste trei propoziții individual. Acum, chiar dacă conjuncția a oricare două

56 Cf. Maudlin, 1995, p. 7.

dintre aceste propoziții este consistentă, conjuncția totală a tuturor acestor propoziții generează o contradicție. Problema privește în special faptul că, dacă luăm în considerare primele două propoziții ca punct de plecare, ajungem la concluzia paradoxală că, la sfârșitul unui proces de măsurare, nici obiectul măsurat, nici instrumentul de măsurare nu posedă o stare determinată. Ca o consecință a ecuației lui Schrödinger, de fapt, interacțiunea care are loc în procesul de măsurare provoacă o inseparabilitate între aparatul de măsurare clasic și sistemul cuantic observat.

Însuși Schrödinger a evidențiat această problemă într-un celebru experiment de gândire. Și-a imaginat o pisică plasată într-o cutie închisă, astfel încât nicio influență externă să nu poată fi exercitată asupra sistemului din interior. De asemenea, în interior erau plasate o cantitate mică de atomi dintr-o substanță radioactivă și un recipient care conținea o otravă care, dacă ar fi inhalată de pisică, i-ar provoca moartea imediată. Dacă un atom se dezintegrează, se declanșează un mecanism care sparge fiola care conține otrava, ucigând astfel pisica. Dezintegrarea unui atom radioactiv este un proces cuantic tipic. Să presupunem că probabilitatea ca un atom radioactiv să se dezintegreze într-o oră este 1/2. Conform ecuației lui Schrödinger, după o oră, stările tuturor obiectelor sunt înlănțuite. În consecință, starea sistemului total constă dintr-o suprapunere a următoarelor corelații: „fără atomi descompuși, mecanism neactivat, pisică vie” și „un atom descompus, mecanism activat, pisică moartă” [57].

Dacă considerăm pisica ca un dispozitiv de măsurare care indică dacă atomul s-a dezintegrat efectiv, aplicarea formalismului teoriei cuantice arată că starea dispozitivului de măsurare este înlănțuită cu starea sistemului cuantic și, prin urmare, nu oferă nicio indicație despre valoarea proprietății măsurate („a fi moartă” sau „a fi vie” a pisicii, în exemplul nostru, se referă respectiv la faptul dacă cel puțin un atom al substanței radioactive din cutie s-a dezintegrat efectiv sau nu). Adăugarea unui observator care deschide cutia nu schimbă această situație în ceea ce privește formalismul teoriei cuantice. În acest caz, starea sistemului total este pur și simplu o suprapunere de corelații: „fără atomi dezintegrați, mecanism neactivat, pisică vie, observatorul vede pisica vie” și „un atom dezintegrat, mecanism activat, pisică moartă, observatorul vede pisica moartă”. Pornind de la formalismul teoriei cuantice, nu avem, prin urmare, acces la descrierea obiectelor macroscopice (cum ar fi dispozitivele de măsurare sau observatorii umani) înțelese ca posedând fiecare o stare determinată.

57 Cf. Schrödinger, 1935, p. 812.

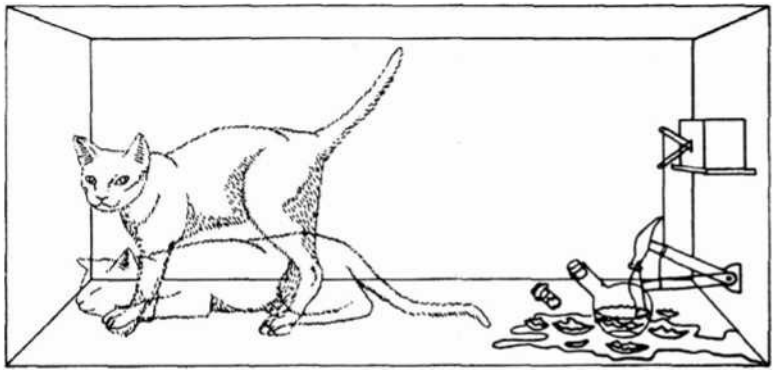


Fig. 8.1 - Pisica lui Schrodinger.

Această problemă este de același tip ca cea considerată anterior în Secțiunea 7.2: în loc de două particule cu spin semi-întreg, în acest caz avem de-a face cu un obiect microscopic și un obiect macroscopic compus din mai multe obiecte microscopice (cum ar fi o pisică sau un dispozitiv de măsurare). Starea totală a acestor două obiecte este înlănțuită și nu este factorizată, adică nu poate fi descrisă prin produsul lor, care descrie în schimb o situație în care fiecare dintre cele două obiecte se află într-o stare determinată independentă de starea celuilalt.

Putem formula problema măsurării și în felul următor, punând accentul nu pe faptul că ecuația Schrödinger este liniară, ci pe faptul că este deterministă [58]:

1. Funcția de undă oferă o descriere completă a obiectelor cuantice, adică o descriere care colectează toate proprietățile posedate de un anumit obiect la un moment dat.
2. Funcția de undă evoluează în timp conform ecuației lui Schrödinger.
3. Experimentele descrise prin funcții de undă inițiale identice dau uneori rezultate diferite; probabilitatea fiecărui rezultat posibil este dată de regula lui Born.

Din nou, conjuncția oricărei perechi a acestor trei propoziții este consistentă, dar conjuncția tuturor celor trei duce la o contradicție. În special, conjuncția primelor două propoziții implică faptul că a treia este falsă.

Mecanica cuantică, însă, este o teorie care funcționează foarte bine; este, de fapt, confirmată de experiența experimentală și deschide calea către multe aplicații tehnice, inclusiv cele care exploatează entanglementul. Motivul pentru care se întâmplă acest lucru este că această teorie oferă un algoritm

58 Cf. Maudlin, 1995, p. 11.

(bazat pe regula lui Born) care ne permite să calculăm cu precizie probabilitățile referitoare la rezultatele posibile ale măsurătorilor, iar aceste predicții sunt pe deplin confirmate empiric. Situația este, așadar, următoarea: avem un algoritm care funcționează foarte bine, dar ne confruntăm cu problema înțelegerii a ceea ce spune acest algoritm despre natură. O formulare a acestei probleme este conjuncția celor trei propoziții discutate mai sus.

8.3. *Decoerență*

Dacă conjuncția celor trei propoziții care constituie problema măsurării generează inconsecvențe, atunci trebuie să abandonăm una dintre ele pentru a obține o teorie consistentă. În schimb, în anii 1970 a fost propusă o nouă abordare (încă foarte populară printre fizicieni și filosofii fizicii) care sugerează că o teorie cuantică consistentă poate fi obținută fără a abandona neapărat niciuna dintre aceste afirmații. Acest program de cercetare folosește noțiunea de *decoerență;* ideea de bază nu este de a concepe un obiect cuantic și un dispozitiv de măsurare ca fiind izolate de restul universului, ci mai degrabă de a lua în considerare și mediul extern. Pe scurt, decoerența arată la prima vedere că starea sistemului cuantic este înlănțuită nu numai cu starea instrumentului de măsurare, ci cu întregul său mediu; în consecință, această perspectivă implică o „creștere" a înlănțuirii mai degrabă decât o reducere a acesteia. Teoria decoerenței arată, de asemenea, că înlănțuirea este răspândită în mediu, ceea ce implică faptul că este posibil să se ofere o descriere a obiectului cuantic luat izolat, ignorând starea sa înlănțuită cu mediul (printr-o abstractizare și simplificare a situației fizice în cauză); și această descriere este utilă în practică [59].

Din punct de vedere teoretic, totuși, trebuie subliniat faptul că decoerența nu adaugă nimic la discuția problemei măsurării. În primul rând, faptul că se poate descrie starea unui obiect fără a lua în considerare starea sa înlănțuită cu stările altor obiecte nu oferă niciun argument pentru a concluziona că o astfel de înlănțuire nu mai există în general.

În al doilea rând, nu se poate spune că decoerența explică de ce obiectele apar unui observator ca și cum ar avea valori fixe pentru proprietățile măsurate sau observate: decoerența nu elimină posibilitatea ca, dacă un - observator interacționează cu un obiect, situația pisicii lui Schrödinger să se poată repeta ; starea observatorului însuși, de fapt, devine încurcată cu cea a obiectului observat și a întregului său mediu.

În al treilea rând, chiar dacă decoerența ar determina o situație în care

59 Vezi Bacciagaluppi, 2007 și Schlosshauer, 2007, precum și articolele din Giulini *et al. ,* 1996, şi Blanchard *și colab. ,* 2000.

obiectul cuantic se află într-o stare determinată (ceea ce este imposibil din punct de vedere matematic), problema măsurării, așa cum este prezentată mai sus, ar rămâne neschimbată: legile dinamice care guvernează dezvoltarea sistemelor cuantice sunt fie deterministe, fie nedeterministe . În primul caz, rezultatul măsurării depinde de condițiile inițiale ale experimentului în sine; iar aici descrierea oferită de funcția de undă nu poate fi completă, deoarece se pot concepe situații inițiale descrise de funcții de undă identice, dar care duc la rezultate diferite (ca în cazul oricărei măsurători a spinului unui electron). Prin urmare, este necesar să se indice explicit variabile suplimentare care determină acest proces și care nu sunt luate în considerare de funcția de undă - negația propoziției (1). În cazul unei dinamici nedeterministe, trebuie apoi să se introducă explicit o ecuație neliniară și stocastică care o înlocuiește pe cea Schrodinger - negația propoziției (2) [60].

8.4. *Prăbușirea funcției de undă*

Formularea standard a mecanicii cuantice, prezentată de obicei în manuale, rezolvă problema măsurării prin negarea propoziției (2): atunci când se efectuează o măsurare, evoluția în timp a funcției de undă dată de ecuația Schrödinger este întreruptă și are loc o reducere a suprapunerii la o stare în care obiectul cuantic capătă o valoare determinată pentru observabilul măsurat. Această reducere a pachetului de undă este cunoscută și sub numele de „colapsul funcției de undă". Cu alte cuvinte, are loc o dizolvare a entanglementului, astfel încât toate obiectele implicate dobândesc o stare determinată și sunt corelate între ele; acest proces este stochastic. Această propunere a fost formulată explicit în cartea din 1932, „ *Fundamentele matematice ale mecanicii cuantice",* de matematicianul Johann von Neumann (1903-1957), care face parte din școala de gândire a lui Niels Bohr și Werner Heisenberg. Această școală este cunoscută în mod tradițional și sub numele de „școala de la Copenhaga". Von Neumann, însă, lasă deschisă întrebarea cu privire la procesele fizice responsabile pentru prăbușirea funcției de undă (1932/1947, capitolul VI.1).

Așa cum s-a discutat mai sus, dacă interpretăm postulatul colapsului funcției de undă epistemic, suntem forțați să negăm propoziția (1): în acest caz, funcția de undă cuantică și evoluția sa conform ecuației Schrödinger nu sunt suficiente pentru a descrie dezvoltarea reală a obiectelor cuantice. Pe de altă parte, dacă înțelegem acest postulat ontologic, ca o descriere a unui proces fizic care are loc în natură, rezultă că este non-local. Cu toate acestea, așa cum am văzut în secțiunea anterioară, non-localitatea este ancorată mai

60 Cf. Maudlin, 1995, pp. 9-13 și Adler, 2003.

profund în formalismul mecanicii cuantice: nu este introdusă de postulatul colapsului funcției de undă. Prin urmare, trebuie să facem distincția între non-localitate și ipoteza că măsurarea creează o realitate care nu există independent de aceasta.

Această ultimă idee este, de fapt, lipsită de sens. Propoziția conform căreia prăbușirea funcției de undă este un proces natural cauzat de (și numai de) acte de măsurare este complet *ad-hoc* și incoerentă: nu există nicio diferență fizică între un proces de măsurare și orice altă interacțiune fizică. Cu alte cuvinte, nu există simultan o interacțiune gravitațională, o interacțiune electromagnetică și, în plus, o interacțiune de măsurare care necesită o lege particulară. Întrucât măsurarea este o interacțiune, este evident că rezultatul unei observații exprimă rezultatul acelei interacțiuni și nu dezvăluie neapărat starea obiectului înainte de măsurarea în sine. Cu toate acestea, este necesar să se distingă această trivialitate de ideea că un act de măsurare creează o realitate care nu ar exista independent de acea observație.

În plus, procesele și dispozitivele de măsurare nu sunt lucruri naturale. Oamenii folosesc diverse obiecte fizice ca dispozitive de măsurare în funcție de nevoile lor; nu se poate da o definiție fizică precisă a unui dispozitiv de măsurare și a unui proces de măsurare. Dispozitivele de măsurare sunt o invenție umană care a apărut târziu în evoluția universului și presupun existența unor obiecte macroscopice situate în spațiu (obiecte care sunt la rândul lor compuse din obiecte microscopice).

John Bell ironizează ideea că actele de măsurare (și numai acestea) induc colapsul funcției de undă:

> [c]e anume califică anumite subsisteme să își asume acest rol [ca dispozitive de măsurare]? Și a așteptat funcția de undă a universului miliarde de ani pentru a face salturi, până când a apărut o ființă vie unicelulară? Sau a trebuit să aștepte puțin mai mult, așteptând un măsurator (cu doctorat) mai calificat? (Bell, 2010, p. 290).

Bell adresează în mod explicit următoarea întrebare fizicienilor într-o lucrare despre ontologia teoriei cuantice a câmpurilor:

> [o] explicație preliminară a acestor concepte a fost intitulată „ *Teoria cuantică a câmpurilor fără* observatori, sau observabile, sau măsurători, sau sisteme, sau aparate, sau colaps al funcției de undă, sau orice de genul acesta", ceea ce ar putea sugera că subiectul în discuție este filosofic. Dar insist că interesul meu este strict profesional. Cred că formulările convenționale ale teoriei cuantice, și în special ale teoriei cuantice a câmpurilor, sunt extrem de neprofesioniste prin vaguitatea și ambiguitatea lor. Fizicienii teoreticieni ar trebui să fie capabili să se descurce mai bine (ibid., p. 230).

Un posibil răspuns la această critică este de a ne baza pe faptul că algoritmul cuantic (regula lui Born) funcționează perfect pentru obținerea de statistici privind rezultatele măsurătorilor. Cu toate acestea, adoptând această

atitudine, abandonăm o teorie care explică ce se întâmplă între pregătirea unui experiment și înregistrarea rezultatelor acestuia (cu alte cuvinte, o teorie care descrie procesele fizice care au loc în natură în timpul proceselor de observare). Aceasta are două consecințe principale: pe de o parte, recunoaște că mecanica cuantică este incompletă, deoarece nu oferă o explicație și o descriere a proceselor care au loc în natură și, pe de altă parte, necesită abandonarea ideii de fizică ca „teorie a *fizicii* ", adică a naturii.

În următoarele două capitole, vor fi discutate trei (sau mai degrabă, patru) propuneri pentru a aborda provocarea lui Bell. A face mai bine în acest context înseamnă a dezvolta o teorie cuantică la același nivel teoretic ca mecanica clasică, electrodinamica sau teoria relativității. A face mai bine, însă, nu înseamnă a oferi predicții mai bune decât cele realizabile prin teoria cuantică. Mai degrabă, scopul este de a deduce regula lui Born dintr-un formalism cuantic care conține legi ce descriu ce se întâmplă în natură.

9. FIZICA CUANTICĂ CA TEORIE A NATURII

9.1. *Teoria lumilor multiple*

Să revenim la problema măsurării; această problemă provine din faptul că propoziția (1), conform căreia funcția de undă oferă o descriere completă a obiectelor cuantice, și propoziția (2), conform căreia aceasta evoluează dinamic conform unei ecuații liniare și deterministe (adică ecuația Schrodinger), conduc la concluzia că, în general, procesele de măsurare nu produc rezultate univoce: la sfârșitul unei măsurători, pisica lui Schrodinger nu este nici vie, nici moartă, ci se află într-o stare de suprapunere între aceste două stări. Această concluzie , însă, mai degrabă decât să fie o reprezentare fidelă a realității, pare a fi o reducere la absurd. În general, dacă acceptăm că rezultatele proceselor de măsurare au rezultate definite, propozițiile (1) și/sau (2) trebuie modificate pentru a rezolva această problemă. Totuși, se poate adopta și o poziție diferită, conform căreia (1) și (2) constituie nucleul formalismului mecanicii cuantice și, prin urmare, această teorie ne obligă să admitem că măsurătorile nu au, în general, niciun rezultat bine definit: pisica lui Schrodinger se află, așadar, într-o suprapunere de stări (a fi viu și a fi mort).

Această propunere radicală își găsește prima expresie pe deplin dezvoltată în teza de doctorat a lui Hugh Everett III (1930–1982) [61]. Ideea de bază pentru o teorie a naturii rezultată din conjuncția propozițiilor (1) și (2) este următoarea: ori de câte ori formalismul mecanicii cuantice descrie starea mai multor obiecte încurcate , unde o astfel de încurcătură constă dintr-o suprapunere de corelații, fiecare dintre aceste corelații este considerată reală și persistentă în timp; mai precis, fiecare dintre ele constituie o „ramură" a universului. Astfel, reconsiderând experimentul mental al pisicii lui Schrodinger, există o ramură (i) a universului în care niciun atom din recipient nu s-a descompus, iar pisica este vie și există, de asemenea, o altă ramură (ii) a universului în care unul dintre atomi se descompune, iar pisica este moartă. Întrucât există multe stări înlănțuite constând dintr-un număr mare de superpoziții și întrucât înlănțuirea ar putea afecta toate obiectele din

61 Cf. Everett, 1957.

univers și toate posibilitățile evolutive ale acestor obiecte (dacă nu există un colaps al funcției de undă), rezultă că există un număr foarte mare de ramificații ale universului. Pentru fiecare obiect, așadar, există un număr mare de copii existente în diferite ramificații ale universului. Din acest motiv, teoria lui Everett este cunoscută sub numele de teoria lumilor multiple .

Considerând un observator, ceea ce se întâmplă este pur și simplu ceea ce am descris în prezentarea experimentului pisicii lui Schrödinger din capitolul anterior: starea de conștiință a observatorului este încurcată cu starea obiectului. Prin urmare, din ideea lui Everett rezultă că există un număr mare de „copii" ale fiecărui observator și ale conștiinței sale, care există în diverse ramuri ale universului. Rezultă că există ramuri ale universului în care observatorul percepe o pisică vie și alte ramuri ale universului în care o copie a aceluiași observator percepe o copie a aceleiași pisici, dar moartă. Întrucât nu există nicio interferență între aceste ramuri (și acest rezultat poate fi dovedit pe baza decoerenței), observatorul care vede pisica vie nu are acces cognitiv la copia sa care vede pisica moartă într-un univers diferit și invers.

Principala provocare pentru interpretarea lui Everett este de a stabili o legătură între această teorie și experiența noastră. Nu se poate pur și simplu abandona propoziția (3) a problemei măsurării, conform căreia performanța măsurătorilor duce întotdeauna la rezultate bine definite. Dacă această afirmație nu este corectă, atunci devine necesar să explicăm de ce lumea ne apare ca și cum ar exista obiecte care au poziții bine definite unele față de altele (cum ar fi atomii care constituie pisica și care sunt configurați în așa fel încât pisica este fie vie, fie moartă). Strategia urmată de susținătorii ideii everettiene este de a interpreta dezvoltarea funcției de undă a universului conform ecuației lui Schrödinger ca conținând experiența noastră. Everett însuși s-a limitat la a spune că rezultatele proceselor de măsurare sunt conținute în diferitele ramuri ale funcției de undă a universului [62]. Totuși, acest răspuns nu este suficient, deoarece *toate* rezultatele posibile ale unei măsurători sunt conținute în ramurile funcției de undă a universului și este necesar să explicăm de ce *unul* dintre aceste rezultate, excluzându-le pe celelalte, ni se pare real.

În literatura contemporană, se pot distinge trei strategii pentru furnizarea acestei explicații.

1. *Multe minți:* Conform acestei propuneri, diferitele ramuri ale universului există doar în relație cu mintea observatorului. Vorbim aici despre multe minți , spre deosebire de multe lumi . Există, în acest caz, multiple ramuri ale minții fiecărui observator între care nu există interferențe, iar fiecare ramură a minții are o experiență specifică (cum ar fi percepția unei pisici

62 Cf. Barrett, 2015.

vii sau percepția unei pisici moarte) [63]. S-ar putea obiecta la această poziție, deoarece mută problema de la relația dintre postulatul ramificării universului și experiența noastră la o teorie foarte particulară a minții, a cărei legătură cu experiența noastră mentală nu este deloc clară.

2. *Spațiul de configurație ca spațiu fizic:* Așa cum s-a explicat în Capitolul 8, funcția de undă este definită în spațiul de configurație . Cu toate acestea, dacă o interpretăm ca un obiect real care constituie realitatea cuantică, rezultă că realitatea noastră fizică este redusă la un câmp definit într-un spațiu multidimensional. Pe scurt, spațiul tridimensional sau cvadridimensional nu mai poate fi spațiu fizic; ceea ce se numește „spațiu de configurație" trebuie considerat spațiu fizic real (în mod eronat, în acest moment, deoarece nu există configurații de particule reprezentate de punctele din acest spațiu). Încercăm apoi să interpretăm evoluția funcției de undă a universului în acest spațiu în diferite ramificații prin decoerență, inclusiv un echivalent funcțional al experienței noastre. Astfel, nu există configurații de atomi care alcătuiesc o pisică vie sau moartă, dar există ceva în dezvoltarea funcției de undă a universului care corespunde funcțional percepției noastre asupra unei pisici vii sau moarte [64].
3. *Funcția de undă în spațiul fizic:* Chiar dacă admitem doar funcția de undă ca obiect existent, putem menține poziția că diferite ramuri ale universului există în spațiu-timp fizic cvadridimensional. Cu toate acestea, se pare că spațiu-timpul însuși se multiplică ori de câte ori funcția de undă se extinde în mai multe ramuri sau ajungem la consecința paradoxală că există proprietăți mutual exclusive în aceeași regiune spațiu-timp, cum ar fi un dispozitiv de măsurare al cărui indicator indică +1 și același dispozitiv al cărui indicator indică -1. În orice caz, această poziție încearcă, de asemenea, să explice experiența noastră printr-un echivalent funcțional al obiectelor fizice obișnuite în extinderea funcției de undă a universului în multiplele sale ramuri [65].

În orice caz, ideea că realitatea constă într-o funcție de undă care se extinde pe mai multe ramuri ale universului lasă numeroase întrebări deschise: Când are loc acest proces de ramificare? Cum este posibil ca obiectele, inclusiv masele, să se duplice? Poate acest proces să satisfacă versiunea relativistă a principiului conform căruia toate sistemele de

63 Cf. în special Albert și Loewer, 1988, și Lockwood, 1989, capitolele 12-13.

64 Vezi în special Albert, 1996 și 2015, capitolele 6 și 7. Albert, însă, admite posibilitatea de a adăuga o colapsare a funcției de undă în spațiul configurației sau într-un univers de particule *(punctul minunat)* în acest spațiu pentru a rezolva problema măsurării. În orice caz, conform concepției sale, indiferent de realitatea fizică, aceasta se găsește în spațiul configurației.

65 Vezi Wallace, 2012, părțile I și III; cf. și Bell, 2004, cap. 15, secțiunea 5; și Allori *și colab* ., 2011.

referință inerțiale sunt echivalente (invarianța Lorentz: vezi Capitolul 4)? Mai mult, ecuația Schrödinger descrie o dezvoltare reversibilă în timp, la fel ca și teoria decoerenței în principiu. Este, prin urmare, și expansiunea multiplelor ramuri ale universului reversibilă? Pot ramurile să se unească?

În ceea ce privește experiența noastră, problema nu este doar modul în care ni se par obiectele cu poziții bine definite, ci și ce semnificație putem da probabilităților. Mecanica cuantică este o teorie care poate fi interpretată operațional, deoarece funcția de undă permite calcularea precisă a probabilităților pentru rezultatele măsurătorilor. Cu toate acestea, conform teoriei lumilor multiple, tot ceea ce este posibil conform formalismului mecanicii cuantice există de fapt. Prin urmare, probabilitățile cuantice nu pot viza nici faptul că un rezultat sau altul al măsurătorii există cu excluderea altor rezultate posibile, nici ignoranța noastră cu privire la care va fi rezultatul unei măsurători. Cu alte cuvinte, într-o teorie deterministă precum mecanica clasică, probabilitățile traduc ignoranța noastră cu privire la condițiile inițiale exacte, bazată pe ipoteza privind dezvoltarea tipică a unui sistem dat (vezi secțiunea 3.2). Dacă, conform interpretării lumilor multiple, însă, tot ceea ce este posibil există, acest mod de a concepe probabilitățile într-o teorie deterministă este abandonat. Se pare

Prin urmare, probabilitățile nu au loc ca ghid pentru acțiunile agenților raționali, deoarece fiecare viitor posibil al fiecărui agent va exista de fapt într-o anumită ramură a universului. Cu alte cuvinte, pentru fiecare viitor posibil al unui individ, există un duplicat al celui care va experimenta acel viitor. În orice caz, statutul probabilităților în teoria everettiană este o chestiune controversată [66].

9.2. *Teoria GRW: Versiunea lui Ghirardi*

Dacă acceptăm, contrar a ceea ce se întâmplă în teoria lui Everett, că măsurătorile au rezultate definite, putem urma ceea ce este scris în manualele de mecanică cuantică și presupune că postulatul colapsului funcției de undă stabilește conexiunea care ne permite să reprezentăm rezultatele unei măsurători date. Totuși, pentru a construi o teorie coerentă pe această bază, trebuie să modificăm ecuația Schrödinger astfel încât să obținem o ecuație care include o expansiune neliniară și stocastică pentru ^. Să încercăm, așadar, să facem precis și inteligibil ceea ce introduce postulatul colapsului funcției de undă într-un mod arbitrar. Dacă ne propunem, cu alte cuvinte, să rezolvăm problema măsurării prin abandonarea propoziției (2), este necesar să formulăm o dinamică coerentă care să conducă la rezultate ale măsurătorilor fără a utiliza noțiuni precum „măsurare" sau „dispozitiv de măsurare", concepte care nu admit definiții fizice specifice.

În acest sens, există o propunere detaliată introdusă de fizicienii italieni Gian Carlo Ghirardi, Alberto Rimini și Tullio Weber (GRW; 1986) [67]. În teoria GRW, evoluția funcției de undă este dată de o modificare a ecuației Schrödinger. Această modificare se bazează pe ideea că funcția de undă suferă salturi stocastice de localizare spontană în spațiul de configurație; între două salturi, însă, funcția de undă evoluează conform ecuației Schrödinger. GRW introduce doi parametri suplimentari, și anume media X și amplitudinea ct a operatorului de localizare a funcției de undă în spațiul de configurație. Acești doi parametri pot fi înțeleși ca noi constante ale naturii, ale căror valori sunt deduse experimental. Valoarea general acceptată pentru X este de ordinul a 10'5 $_s$ ′ ; această valoare implică faptul că localizarea spontană a funcției de undă a unei particule individuale are loc doar pe o scară de timp astronomică de ordinul a 10 $^{\wedge 15}$ s . Pe de altă parte, pentru un obiect macroscopic compus din 10 $^{\wedge 23}$ particule, localizarea spontană a

66 Vezi, pe de o parte, Wallace, 2012, partea a II-a; Wilson, 2013; și, pe de altă parte , Dawid și Thébault, 2014; Maudlin, 2014; Dizadji-Bahmani, 2015; și Albert, 2015, cap. 8.

67 Vezi și Ghirardi, 2005, cap. 16, 8 și 17.

funcției sale de undă are loc într-o mică fracțiune de secundă. În consecință, posibilele suprapuneri macroscopice (cum ar fi cea dintre starea de „pisică vie" și „pisică moartă") se dizolvă cu mult înainte de a fi observabile empiric.

Ideea este, așadar, că un obiect microscopic luat izolat are o probabilitate obiectivă foarte mică de a se localiza spontan într-o poziție bine definită. Dacă, pe de altă parte, considerăm un obiect macroscopic compus dintr-un număr foarte mare de particule microscopice, atunci una dintre aceste particule va suferi aproape imediat o localizare, astfel încât, datorită încurcării stărilor acestor particule, *toate vor avea* o poziție definită. Obiectul macroscopic se va afla, așadar, într-o poziție bine definită. Prin urmare, dacă un obiect microscopic este plasat în interacțiune cu un obiect macroscopic (ca, de exemplu, în timpul unui proces de măsurare), starea primului devine încurcată cu cel de-al doilea, astfel încât obiectul microscopic este inclus în reducerea stării care are loc în cea macroscopică. În acest fel, și el va dobândi o poziție determinată în spațiul fizic.

Totuși, simpla adăugare a unui operator de localizare a funcției de undă la ecuația Schrodinger nu este suficientă pentru a rezolva problema măsurării, deoarece avem încă de-a face cu o ecuație care descrie evoluția funcției de undă în spațiul configurației. Prin urmare, rămâne problematic să conectăm funcția de undă și legea evoluției sale temporale - propozițiile (1) și (2) - la evenimente din spațiul fizic tridimensional sau cvadridimensional (cum ar fi rezultatele măsurătorilor care apar în poziții precise în spațiul fizic - propoziția (3). Toate abordările care pornesc de la existența unor astfel de evenimente și care încearcă să rezolve problema măsurării susținând că formalismul mecanicii cuantice se referă la entități din spațiul fizic și descrie evoluția lor, sunt cunoscute sub numele de teorii cu ontologie primitivă [68]. Acest mod de utilizare a noțiunii de ontologie primitivă este mai strict decât modul în care acest termen a fost introdus în capitolul 3. În contextul cuantic, vorbim și despre „ființe locale" . John Bell (2010, cap. 7) a creat acest lucru. neologism pentru a concentra atenția asupra faptului că orice teorie fizică, pentru a fi formulată cu precizie, trebuie să indice explicit ce entități există în spațiu și timp și că noțiunea operațională de „observabil" nu ar trebui considerată fundamentală, așa cum se întâmplă în schimb în cazul manualelor de mecanică cuantică.

Răspunzând la această provocare, Ghirardi propune o ontologie conform căreia ceea ce există în spațiul fizic tridimensional este un câmp de densitate a materiei (Ghirardi, Grassi și Benatti 1995). Acest câmp $_{mt}(x)$ presupune valori ale densității materiei în puncte din spațiul fizic conform următoarei legi, care stabilește o legătură între funcția de undă în spațiul de configurație

68 Cf. Allori *și colab.,* 2008, 2014.

și distribuția materiei în spațiul fizic [69]:

$$m_t(x) = \pounds^{M_k} d^3 xi...d?x_N 6^3 (xx_k)\backslash Vt(xi,...,x_N')\backslash^2 \quad (9.1)$$

În această ecuație, *m* reprezintă densitatea materiei în punctele *x* din spațiul fizic R3 la momentul *t , k* indică variabila corespunzătoare particulelor, iar *Mk este* masa particulei kapp. Totuși, deși această teorie este formulată cu un număr fix de particule *k* = 1, ..., *N,* ea nu propune o ontologie formată din obiecte corpusculare . Prin urmare, chiar dacă am adăuga la ecuația Schrodinger parametri care ar induce colapsul funcției de undă, ar fi necesar să se concepă o altă lege care să stabilească o legătură între funcția de undă și distribuția materiei în spațiul fizic, chiar dacă această distribuție este complet reprezentată de funcția de undă.

Conform acestei teorii, cunoscută sub numele de teoria GRWm, nu există particule (adică obiecte discrete) în natură. Există un singur obiect în univers, și anume un câmp de densitate a materiei care se extinde în tot spațiul și posedă diferite grade de densitate în diferite puncte ale acestuia, care variază în timp. Cu alte cuvinte, teoria GRWm este exemplul paradigmatic al unei ontologii care admite un câmp ca singura formă a materiei (vezi Capitolul 4).

Această teorie explică percepția noastră asupra obiectelor discrete printr-o concentrare spontană a densității de materie în anumite regiuni ale spațiului. Această concentrare este reprezentată în formalismul GRWm prin localizarea spontană a funcției de undă în spațiul de configurație. Pentru a ilustra ce se înțelege prin localizare spontană conform acestei teorii, să revenim pentru o clipă la exemplul particulei din cutie, prezentat de Einstein la Congresul Solvay din 1927 și discutat în Capitolul 7. Când cutia este împărțită în două jumătăți *B1 și* B2 *de dimensiuni egale* , densitatea de materie a particulei este, de asemenea, împărțită în două jumătăți de densitate egală care se propagă în direcții opuse, pe măsură ce cutiile sunt transportate de la Bruxelles la Paris și, respectiv, Tokyo . Să presupunem că deschidem cutia *B1* din Paris și o găsim goală . În acest caz, teoria GRWm oferă următoarea explicație: la deschiderea cutiei *B1 din* Paris, partea din densitatea de materie a particulei din această cutie se deplasează imediat, astfel încât toată densitatea de materie a particulei este concentrată în cutia *B2 din Tokyo. Această delocalizare este reprezentată* de colapsul funcției de undă a particulei în spațiul configurației, un colaps indus de deschiderea cutiei din Paris. Totuși, această delocalizare nu este o deplasare care are loc cu o anumită viteză; mai degrabă, ea are loc instantaneu, indiferent de distanța care trebuie parcursă în spațiul fizic. Această explicație amintește de critica lui Einstein în termeni de „acțiune la distanță ", adică un transport instantaneu de materie (masă) pe

69 Cf. ivi, catedră. 3.1.

distanțe spațiale arbitrar de mari.

În plus, nu este sigur că teoria GRWm oferă cu adevărat o soluție la problema măsurării. Dezbaterea se concentrează pe faptul că, în urma unei localizări spontane a funcției de undă în spațiul configurației, cea mai mare parte a densității materiei reprezentate de funcția de undă în cauză este concentrată într-o locație precisă în spațiul fizic, dar există încă o mică fracțiune din densitatea materiei care nu este localizată în aceeași locație. În acest sens, este util să reconsiderăm experimentul pisicii și să luăm în considerare o situație în care evoluția determinată de ecuația Schrödinger duce la o suprapunere a două stări macroscopice de probabilitate egală (o pisică moartă și o pisică vie). Evoluția conform ecuației GRW garantează că cele două stări de suprapunere nu rămân egale, ci că una dintre ele (de exemplu, cea corespunzătoare unei pisici moarte) se apropie de unitate, în timp ce cealaltă devine extrem de mică (se apropie de zero). În ceea ce privește densitatea materiei, aceasta înseamnă că, deși cea mai mare parte a densității care alcătuiește pisica este într-o stare moartă, există încă o mică concentrație a acestei densități în starea „pisică vie". Problema, așadar, este că densitatea de materie a „pisicii vii", oricât de mică, este identică din punct de vedere funcțional și structural cu cea a „pisicii moarte". Pe scurt, se pare că, dacă unul dintre cele două rezultate este real, celălalt este cumva la fel de real.[70] [71]În orice caz, teoria GRW nu poate reproduce exact predicțiile la care ajung manualele de mecanică cuantică folosind regula lui Born. Există situații în care există o mică diferență între cele două tipuri de predicții. Acest fapt deschide, cel puțin în principiu, calea către teste experimentale ale teoriei GRW [11].

9.3. *Teoria GRW: versiunea lui Bell*

Există o altă modalitate de a rezolva problema legăturii dintre funcția de undă și evoluția sa conform ecuației GRW în spațiul de configurație, pe de o parte, și materie și evoluția sa în spațiul fizic, pe de altă parte. Nu este necesar, de fapt, să atribuim colapsului funcției de undă un sens ontologic de dislocare instantanee a materiei în spațiul fizic (ceea ce Einstein își propune să realizeze). Bell (2010, cap. 22) propune că doar evenimentele de localizare spontană a funcției de undă în spațiul de configurație reprezintă materia în spațiul fizic, dar nu și evoluția sa între două salturi. Fiecare eveniment de localizare spontană a funcției de undă în spațiul R3N [corespunde] apariției materiei

70 Cf. Maudlin, 2010, pp. 134-138; pentru o concluzie opusă, cf. Monton, 2004; Wallace, 2014; Albert, 2015, pp. 150-154; Egg și Esfeld, 2015, secțiunea 3.

71 Cf. Curceanu *și colab*., 2016.

concentrate în jurul unui punct din spațiul fizic. A devenit obișnuit să se numească aceste evenimente „blițuri [72]", iar teoria este, prin urmare, cunoscută sub numele de teoria GRWf.

I În spațiu-timp există doar flash-uri: dată fiind o distribuție inițială de flash-uri, funcția de undă descrie probabilitatea obiectivă ca alte evenimente de localizare să aibă loc în jurul unor puncte spațiu-timp. Cu toate acestea, niciun eveniment sau proces în spațiu-timp nu constă într-o reducere a superpozițiilor sau a stărilor înlănțuite care ar corespunde reducerii funcției de undă în spațiul de configurație. Motivul este că nu există superpoziții sau stări înlănțuite în spațiu-timp fizic, ci doar flash-uri în puncte foarte specifice din spațiu-timp.

Luând consecințele acestei ontologii la propriu, obiectele macroscopice ar fi „galaxii de sclipiri". Deși s-ar putea presupune că această idee ne permite să reconstruim obiecte macroscopice [73], distribuția sclipirilor în spațiu-timp este rară: există sclipiri doar în punctele spațiu-timp unde are loc localizarea spontană, în conformitate cu formalismul teoriei GRW. Acest lucru este problematic din următorul motiv: teoria GRWf ia în considerare apariția și dispariția spontană a sclipirilor, dar nu poate explica interacțiunile. În special, concepția interacțiunilor de măsurare prevăzută în formalismul GRW original (Ghirardi, Rimini și Weber, 1986) nu se aplică unei ontologii a sclipirilor. Chiar dacă se admite că un dispozitiv de măsurare constă dintr-o „galaxie de sclipiri", nu există nimic, conform teoriei GRWf, cu care dispozitivul de măsurare interacționează: nici o particulă care intră în dispozitiv, nici o densitate de materie, nici o undă. Există o singură sclipiri în conul său de lumină trecut (care înlocuiește ceea ce este de obicei considerat un obiect cuantic), dar această sclipiri este efemeră, ca toate celelalte. Pe scurt, este îndoielnic dacă teoria sclipirilor are resursele conceptuale necesare pentru a constitui o ontologie convingătoare a realității noastre fizice.

10. FIZICA CUANTICĂ ȘI FIZICA CLASICĂ

10.1. *Mecanica bohmiană*

72 Acest termen a fost introdus de Tumulka, 2006, p. 826.
73 Cf. obiecția lui Maudlin, 2011, pp. 257-258.

Având în vedere discuția teoriilor lui Everett și GRW din capitolul anterior, pot fi evidențiate trei caracteristici comune ale acestor cadre teoretice. În primul rând, (i) formalismul acestor teorii este conceput în termeni de variabile care denotă pozițiile particulelor, la fel ca cel al mecanicii clasice; spațiul de configurație, de fapt, este definit ca o funcție a numărului de particule considerate într-o situație fizică dată. Cu toate acestea, ontologia acestor teorii nu are în vedere obiecte corpusculare: pe de o parte, conform teoriei lui Everett, există doar funcția de undă; pe de altă parte, ceea ce există în univers conform teoriei GRW este fie un câmp de densitate a materiei (GRWm), fie evenimente de localizare izolate (blițuri GRWf). Mai mult, (ii) parametrul legat de poziție joacă un rol crucial în aceste formalisme: la Everett, ramificarea funcției de undă se referă la diferitele poziții prezente în argumentul său, în timp ce în ambele versiuni ale teoriei GRW, atribuim întotdeauna o valoare definită poziției (densitatea materiei în puncte din spațiu, pe de o parte, poziția blițurilor, pe de altă parte) și reconstruim toate celelalte observabile pe această bază. În cele din urmă, (iii) discuția teoriei GRWm a oferit indicații clare despre modul în care postulatul colapsului funcției de undă, conceput ontologic și, prin urmare, considerat un proces fizic, oferă o explicație problematică a nonlocalității cuantice; prin urmare, este legitim să ne întrebăm dacă se poate renunța la el în legile pe care le presupunem că reprezintă ceea ce se întâmplă în natură.

Acestea fiind spuse, întrebarea care trebuie pusă este atunci dacă putem transforma un formalism care se referă doar superficial la particule într-o ontologie eficientă pentru mecanica cuantică, concepută și formulată corect în termeni de particule caracterizate prin pozițiile lor în spațiul fizic și guvernate de o lege care descrie evoluția lor.

Acest proiect poate fi motivat și de următorul raționament, care urmează raționamentul schițat anterior de Bell, bazat pe posibile soluții la problema măsurării în termeni de „ființe locale" definite în spațiul fizic1 : (i) orice rezultat al măsurătorii constă într-o poziție precisă a unui obiect, cum ar fi indicatorul unui dispozitiv care indică o anumită direcție, un punct pe un ecran etc. (ii) Dacă obiectele macroscopice (cum ar fi dispozitivele de măsurare) sunt situate în spațiu, obiectele microscopice care le compun sunt, în consecință, și ele situate în spațiu, (iii) Obiectele macroscopice sunt localizate independent de faptul că cineva le observă sau nu (și afirmăm acest lucru prin referire la bunul simț). Ar fi absurd, de exemplu, să presupunem că luna nu ocupă o poziție precisă atunci când nu este observată (poate pentru că cerul este prea înnorat). (iv) Rezultă din (ii) și (iii) că obiectele microscopice care le compun pe cele macroscopice sunt localizate independent de orice observație. Astfel, concluzionăm că (v) obiectele microscopice sunt localizate atunci când compun obiecte macroscopice dacă și numai dacă sunt

întotdeauna localizate. Ar fi absurd să presupunem că un obiect macroscopic (cum ar fi un dispozitiv de măsurare) poate interacționa cu un obiect microscopic care nu este localizat nicăieri în spațiu și că această interacțiune „forțează" cumva obiectul microscopic să ia instantaneu o anumită poziție. Prin urmare, suntem determinați să presupunem că prăbușirea funcției de undă nu este un proces fizic care are loc în spațiu- timp. Acest argument conduce la următoarea concluzie: *ontologia primitivă a particulelor nu se schimbă în timpul tranziției de la fizica clasică la cea cuantică.* Ceea ce se schimbă este structura dinamică a teoriilor, adică legea care guvernează mișcarea particulelor.

conferința Solvay din 1927 - poate fi urmărită până la fizicianul francez L. de Broglie (1928). A fost apoi dezvoltată și extinsă de fizicianul american D. Bohm în 1952 și elaborată în continuare de Bell în anii 1960.[74] [75]Versiunea dezvoltată de Bell este în prezent cea mai răspândită și este cunoscută sub numele de „mecanică bohmiană" [76]. Putem rezuma structura fundamentală a mecanicii bohmiene cu următoarele patru postulate:

74 Cf. Bell, 2010, în special Cap. 7.

75 Cf. ivi, în special titlurile. 3, 4, 17.

76 Cf. Dürr, Goldstein și Zanghì, 2013, și Dürr și Teufel, 2009 pentru o introducere matematică și fizică a teoriei; și Goldstein, 2006 pentru o introducere privind accesul facil.

1. Există întotdeauna o configurație Q în univers care conține un număr constant *N de particule caracterizate doar de pozițiile* lor $Q1t$, $Q2t$, QNt GR3 în puncte din spațiul euclidian tridimensional la fiecare instant *timp* t G R
2. Funcția de undă este parametrul dinamic central al teoriei, iar sarcina sa este de a determina viteza particulelor în timp, dată fiind poziția lor. Prin urmare, funcția de undă ghidează literalmente particulele, motiv pentru care legea mișcării care guvernează evoluția lor temporală este cunoscută sub numele de *ecuația călăuzitoare:*

$$\frac{dQt}{dt} = m \, Vti(Qt)$$

unde - este constanta lui Planck împărțită la 2^, S este partea imaginară și *m* este masa (pentru a simplifica formalismul ecuației, presupunem că masa are o valoare constantă pentru toate particulele).

3. Funcția de undă, la rândul ei, se dezvoltă dinamic conform ecuației lui Schrodinger.
4. Ecuația călăuzitoare și ecuația Schrodinger sunt legate de o măsură de probabilitate, cunoscută sub numele de „ipoteza echilibrului cuantic", care implică regula lui Born pentru prezicerea rezultatelor măsurătorilor asupra subsistemelor universului.

Pornind de la aceste postulate, mecanica bohmiană deduce algoritmul cuantic prezentat în manuale [77].

Primul postulat conține esența, aspectul principal al soluției pe care mecanica bohmiană o propune pentru a rezolva problema măsurării: există întotdeauna o anumită configurație a particulelor în univers cu o poziție precisă în spațiul fizic; pisica lui Schrodinger, prin urmare, se află întotdeauna fie într-o configurație care constituie pisica vie, fie într-una care constituie pisica moartă. Nu există o suprapunere de stări în natură. Cu toate acestea, pozițiile reale pe care astfel de obiecte le asumă în spațiul fizic nu sunt cunoscute; rezultă că teoria bohmiană respinge propoziția (1) a problemei măsurării, conform căreia funcția de undă oferă o descriere completă a obiectelor fizice (vezi paragraful 8.2). Din acest motiv, în literatura de specialitate se susține că această teorie adaugă așa-numitele variabile „ascunse" la formalismul standard al mecanicii cuantice. Totuși, expresia „variabile ascunse" poate genera o neînțelegere, deoarece aceasta

77 Pentru acest rezultat, vezi în principal Dürr, Goldstein și Zanghì, 2013, cap. 2, și Goldstein și Struyve, 2007.

Ceea ce este evident și ceea ce explică dovezile în sine sunt tocmai pozițiile obiectelor în spațiul fizic, chiar dacă valorile acestor poziții nu sunt cunoscute. Pe scurt, dacă există ceva „ascuns", este mai degrabă funcția de undă (deoarece nu este niciodată observabilă). În acest sens, Bell susține cu vehemență că a considera, în teoria lui Bohm, pozițiile particulelor drept „variabile ascunse" și nu funcția de undă este „un exemplu de stupiditate istorică" (Bell 2010, p. 217).

Într-adevăr, el subliniază (ibid., p. 222) că fiecare rezultat al măsurătorii constă în observarea unei poziții precise a unui obiect dat. Cu alte cuvinte, toate măsurătorile se reduc la măsurători de poziție și, în consecință, toate rezultatele măsurătorilor sunt înregistrate în termeni de poziții ale obiectelor, așa cum se întâmplă, de exemplu, în cazul unei poziții date a unui indicator pe un dispozitiv de măsurare. Chiar și în celebrul experiment cu dublă fantă, care se presupune că evidențiază natura ondulatorie a obiectelor cuantice, ceea ce se observă sunt urmele lăsate de particule sub formă de puncte pe un ecran. Mai mult, în timpul discuției teoriilor clasice de câmp, am arătat că toate dovezile experimentale constau în pozițiile relative ale particulelor și schimbarea poziției lor: câmpurile sunt introduse tocmai pentru a explica această schimbare (vezi secțiunile 4.2 și 6.5); acest lucru explică de ce mecanica bohmiană privilegiază poziția, care se dovedește a fi singura proprietate a unor astfel de obiecte. Alte observabile cuantice, inclusiv spinul, nu sunt proprietăți intrinseci ale obiectelor cuantice și nici proprietăți contextuale, adică proprietăți care există doar în contextul măsurătorilor. Acestea sunt pur și simplu modul în care se comportă obiectele în anumite situații experimentale - adică, reprezintă anumite forme de mișcare a obiectelor [78].

Astfel, mecanica bohmienă plasează *toți* parametrii (inclusiv masa și sarcina) în funcția de undă, care, așa cum s-a menționat, este parametrul dinamic central al întregii teorii [79]. Prin urmare, parametrul m din ecuația directoare (10.1) este doar o constantă și nu o proprietate aparținând particulelor individuale. Mai mult, chiar și în contextul mecanicii bohmiene trebuie să se țină cont de nonlocalitatea cuantică stabilită de teorema lui Bell (vezi secțiunea 7.3). Acesta este motivul pentru care ecuația directoare (10.1) este definită pentru întreaga configurație a particulelor din universul Q , iar funcția de undă care apare acolo este, prin urmare, funcția de undă universală. Viteza fiecărei particule la fiecare moment t depinde în principiu de poziția tuturor celorlalte particule din univers la t , prin intermediul

78 Vezi Bell, 2010, pp. 47–48 și Norsen, 2014, pentru abordări ale spinului în acest sens.

79 Vezi Brown *și colab.* , 1995 și 1996; Pylkkanen *și colab.* , 2015; Esfeld *și colab.* , 2017.

funcției de undă ^.

Această dependență, însă, nu înseamnă că vreo entitate este instantaneu delocalizată în spațiul fizic: particulele bohmiene se mișcă întotdeauna de-a lungul unor traiectorii continue în spațiul fizic cu o viteză dată. Mișcările lor sunt corelate între ele, fără ca nimic din spațiu să transmită această corelație. Formal, această dependență se explică prin faptul că teoria bohmienă adaugă la funcția de undă din spațiul de configurație postulatul că un punct *Q* reprezintă configurația curentă a particulelor în spațiul fizic, astfel încât ecuația călăuzitoare descrie evoluția acestui punct în spațiul de configurație. Conceptual , particulele sunt caracterizate doar de pozițiile lor, sau mai precis de pozițiile lor relative, adică de distanțele lor. Acum, într-o configurație de particule caracterizată exclusiv de distanța lor, schimbarea distanței dintre două particule poate, în principiu, avea efectul de a schimba relațiile de distanță ale tuturor particulelor din configurație: o particulă nu se poate apropia sau îndepărta de alta fără a-și schimba și distanța față de celelalte particule din configurație. Cu toate acestea, ar fi inutil să căutăm un agent sau o forță care să transmită această schimbare. Acest lucru clarifică faptul că ar putea exista mișcări corelate între particule, fără a exista nimic în spațiul fizic care să stabilească aceste corelații, dar nu explică de ce există corelațiile specifice evidențiate, de exemplu, în experimentul EPR.

10.2. *Holismul cuantic*

În acest context, putem vorbi despre *holism dinamic:* există un singur parametru dinamic, și anume funcția de undă, care determină evoluția configurației materiei în ansamblu, deoarece fiecare teorie fizică este o teorie universală, adică se aplică întregului univers . Mai mult, în teoria gravitațională newtoniană, forța gravitațională este, de asemenea, o interacțiune care acționează la distanță, ceea ce înseamnă că, în principiu, accelerația gravitațională a unei particule la un moment dat depinde de pozițiile și masele tuturor celorlalte particule din univers. Cu toate acestea, atracția gravitațională este întotdeauna calculată pentru perechi de particule pe baza unui parametru dinamic.

care este atribuit fiecărei particule individual, și anume masa sa gravitațională. În fizica cuantică, pe de altă parte, există un singur parametru dinamic pentru toate particulele.

Până în prezent, nu este posibil să explicăm, cu cunoștințele pe care le-am dobândit, de ce dinamica care descrie cel mai bine ceea ce se întâmplă în natură este holistică (fizica cuantică) mai degrabă decât locală (teoria clasică a câmpurilor). Mai mult, ar fi inutil să căutăm un mecanism care să stabilească corelații non-locale, similare cu cele avansate de teorema lui Bell, dar se poate sublinia totuși că holismul dinamic nu se limitează la fizică. El poate fi aplicat și conceptelor: conform holismului semantic, conținutul conceptual al unei credințe sau propoziții constă în relații inferențiale cu alte credințe sau propoziții. Prin urmare, modificarea uneia sau a alteia modifică în principiu relațiile inferențiale în contextul sistemului în cauză [80]. Deși nu se poate oferi niciun motiv pentru care holismul dinamic se aplică fizicii cuantice, putem totuși propune o explicație în termeni de unificare, subliniind că un astfel de holism poate fi prezent și în alte domenii, cum ar fi semantica.

În semantică, ca și în fizica cuantică, trebuie să limităm holismul pentru a-l face inteligibil. Astfel, deși schimbarea unei credințe sau a unei propoziții implică în principiu o schimbare a relațiilor inferențiale dintre toate celelalte credințe și propoziții dintr-un sistem dat, sensul acestei schimbări trebuie limitat la un număr mic de credințe sau propoziții: orice schimbare conceptuală este inteligibilă doar pe baza unui fundal stabil, compus dintr-o majoritate de relații inferențiale neschimbate între credințe sau propoziții. În mod similar, Einstein subliniază că o suspendare completă a principiilor separabilității și acțiunii locale ar face fizica așa cum o cunoaștem imposibilă, deoarece nu am mai putea izola sistemele fizice individuale și efectua experimente pe acele sisteme izolate (vezi secțiunea 8.1).

Mecanica bohmiană răspunde la această cerință după cum urmează: deși funcția de undă universală se dezvoltă temporal conform ecuației Schrödinger, astfel încât stările înlănțuite nu se dizolvă niciodată (fără colaps) datorită decoerenței, în multe situații este posibil să se introducă funcții de undă eficiente pentru subsistemele universului (sau chiar particule individuale), care în situații practice se dezvoltă independent de mediul lor. Particulele descrise de funcțiile de undă efective urmează adesea traiectorii clasice sau cvasi-clasice. În acest fel, mecanica bohmiană oferă o tranziție către domeniul fizicii clasice, chiar dacă structura sa dinamică este profund nelocală. Astfel, în experimentul mental al lui Einstein din 1927, particula se află întotdeauna fie în cutia trimisă la Paris, fie în cutia trimisă la Tokyo,

80 Vezi Esfeld, 2001 pentru o comparație a acestor diferite forme de holism.

deplasându-se de-a lungul unei traiectorii clasice (vezi Capitolul 7). În concluzie, teoria lui Bohm, deși profund nelocală, nu permite „mai multă nelocalitate decât este necesar" pentru a obține predicții corecte: oferă un tratament clasic al cazului lui Einstein din 1927 și un tratament neclasic al cazului EPR.

10.3. *Statutul ontologic al funcției de undă*

Funcția de undă cuantică este un parametru de câmp și, așa cum am discutat anterior (vezi secțiunea 4.2), acest lucru este problematic: ideea unei interacțiuni între un câmp și particule este, de fapt, problematică chiar și în electrodinamica clasică. Mai mult, în contextul fizicii cuantice, funcția de undă nu este definită în spațiul fizic tridimensional sau cvadridimensional, ci mai degrabă în spațiul de configurație. Cum ar putea un câmp definit într-un astfel de spațiu să influențeze mișcarea obiectelor într-un alt spațiu? În teoria lui Bohm, precum și în teoria GRW, funcția de undă este un parametru dinamic introdus prin funcția dinamică îndeplinită de ontologia primitivă (particule, densitatea materiei sau flash-uri). Acest fapt face posibilă acordarea concretă a funcției de undă a statutului de parametru dinamic, și nu ontologic, conform căruia ar fi un obiect fizic dincolo de elementele ontologiei primitive. Mai mult, putem interpreta statutul lui în contextul metafizicii humiene (vezi secțiunea 3.4): la fel ca parametrii clasici precum masa și sarcina, funcția de undă este un instrument pentru obținerea unei descrieri atât simple, cât și informative a mișcării particulelor, care manifestă anumite modele sau regularități. În virtutea acestora, parametrul dinamic al funcției de undă (funcția de undă universală, precum și cele efective) figurează în legile care descriu această mișcare [81]. Aceasta nu este doar o poziție filosofică: Dowker și Herbauts (2005) au dezvoltat un model fizic concret în acest sens în cadrul teoriei GRWf care lucrează cu spațiu-timp discret.

În acest sens, există și propuneri de formulare a mecanicii cuantice fără a utiliza funcția de undă în cadrul său dinamic [82]. Ideea este de a utiliza direct traiectoriile particulelor bohmiene pentru a concepe o dinamică care include interacțiuni cuantice pe lângă interacțiunile clasice; această abordare, însă, trebuie să permită traiectorii multiple pentru particule individuale și, din acest motiv, vorbim despre mai multe lumi clasice care interacționează.

Dacă considerăm funcția de undă ca un parametru dinamic în contextul

81 Vezi Miller, 2014; Esfeld, 2014; Callender, 2015; și Bhogal și Perry, 2017.
82 Vezi Schiff și Poirier, 2012; Hall *și colab.,* 2014; și Sebens, 2015.

metafizicii humiene, consecința este că este imposibil să admitem orice relații de inseparabilitate în natură, altele decât relațiile de distanță dintre particule. Starea cuantică nu conectează în mod misterios mișcarea particulelor prin
10 spațiu prin ghidarea sau controlul acestora într-un mod coordonat; nu există stări cuantice în natură, deși toate propozițiile formulate în termeni de stări cuantice sunt perfect adevărate. Cu alte cuvinte, este un fapt contingent că modul în care se mișcă particulele este de așa natură încât prezintă niște corelații stabile, așa că, dacă ne propunem să reprezentăm mișcarea lor într-un mod simplu și informativ, trebuie să o facem printr-o stare cuantică înlănțuită și o lege care prezintă o funcție de undă în acea stare. Având în vedere această lege, avem, prin urmare, un factor de adevăr pentru propoziții contrafactuale despre ce s-ar întâmpla cu mișcarea altor particule dacă acestea ar interveni într-un anumit fel asupra mișcării unei particule specifice, fără a ne cere însă să admitem că există influențe misterioase în natură care acționează de la distanță de la o particulă la alta.

În orice caz, aceasta nu este o formă de instrumentalism privind funcția de undă: aceasta din urmă este, la prima vedere, un parametru dinamic care apare în legea mișcării particulelor și este ea însăși supusă unei legi (și anume, ecuația lui Schrödinger). Aceste legi, în plus, sunt legate de calculul probabilităților, deoarece acesta este utilizat pentru a calcula probabilitățile rezultatelor măsurătorilor, conform regulii lui Born. Pe scurt, funcția de undă nu este doar un instrument pentru
11 calculul probabilităților, ci, mai degrabă, rolul său fundamental este - dinamic, chiar dacă nu implică faptul că aparține ontologiei primitive a unei teorii cuantice.

În concluzie, mecanica bohmiană evidențiază faptul că o ontologie minimalistă a particulelor, caracterizată exclusiv prin distanțele lor relative și distanțele lor în schimbare, poate fi într-adevăr o alternativă validă în mecanica cuantică [83]. Formalismul mecanicii cuantice, însă, se bazează pe un număr fix și finit de particule. În acest sens, mecanica bohmiană arată că nu există niciun motiv pentru a nu considera particulele prezente în formalismul mecanicii cuantice drept particule în sens ontologic, adică obiecte punctuale care se mișcă pe traiectorii continue. În acest fel, este posibil să se obțină o soluție clară la problema măsurării și o înțelegere a nonlocalității cuantice. Rezultă că, dacă abandonăm o ontologie a particulelor, ar trebui să abordăm problema măsurării și cea a „acțiunii la distanță". Este apoi posibil să se afirme că ceea ce se schimbă în tranziția de la mecanica clasică la mecanica cuantică nu este ontologia primitivă, ci structura dinamică care descrie

83 Pentru elaborări ale mecanicii boeme fără o angajament ontologic față de un spațiu și timp absolut, cf. Vassallo *și colab.* , 2017 și Vassallo și Ip, 2016.

evoluția configurațiilor particulelor.

Totuși, merită să se țină cont de faptul că noțiunea de ontologie primitivă utilizată în contextul ontologiei noastre minimaliste este mai generală decât cea de „ființe locale" folosită de Bell pentru a marca contrastul dintre o ontologie cuantică bazată pe funcția de undă (cum ar fi teoria lui Everett), pe de o parte, și o ontologie care admite entități fizice în spațiul tridimensional (pentru a rezolva problema măsurării) și consideră funcția de undă ca un parametru care descrie evoluția acestor entități, pe de altă parte. Ontologia minimalistă pe care am discutat-o în această carte lasă deschisă doar problema geometriei care reprezintă aceste distanțe și schimbarea lor. Cu alte cuvinte, nu se angajează să susțină că această geometrie trebuie să fie tridimensională și nu cvadridimensională (vezi secțiunile 2.2 și 3.1). Din punctul de vedere al unei astfel de ontologii, așadar, obiecția centrală împotriva teoriei lui Everett nu este că există o lipsă de „ființe locale" în spațiul tridimensional sau cvadridimensional, ci că ontologia dualistă în care există un spațiu și un câmp material definite pe acesta nu este motivată independent de câte dimensiuni are.

10.4. *Statutul ontologic al probabilităților*

Ca și în cazul ontologiei primitive, nu există motive convingătoare pentru a schimba concepția probabilității în tranziția de la mecanica clasică la mecanica cuantică. În toate teoriile

În teoriile cuantice, al căror formalism are referințe directe la obiecte existente în spațiul fizic și care interpretează funcția de undă ca un parametru dinamic utilizat pentru a descrie evoluția lor, există acces epistemic limitat la proprietățile entităților care constituie ontologia primitivă a teoriei date [84]. Dacă am cunoaște configurația completă a acestor obiecte (cum ar fi pozițiile particulelor bohmiene sau ale flash-urilor în GRWf sau densitatea materiei în GRWm), am putea folosi corelații nelocale pentru a schimba informații la o viteză mai mare decât viteza luminii, încălcând teoria relativității speciale. Cu toate acestea, deoarece măsurarea este o interacțiune între obiecte, rezultă că accesul nostru la obiectele fizice poate fi limitat. În mecanica cuantică, de fapt, principiul incertitudinii lui Heisenberg relevă această limită de acces: nu putem măsura simultan poziția și viteza unui obiect cuantic cu o precizie arbitrară.

În fizica clasică, acest acces limitat poate fi adesea ignorat deoarece, în multe situații, chiar și cea mai mică incertitudine în condițiile inițiale nu afectează acuratețea predicțiilor. Cu toate acestea, există multe situații în acest context în care această incertitudine are consecințe grave. Dacă, de exemplu, se aruncă o monedă, o mică modificare a condițiilor inițiale poate schimba drastic rezultatul; tocmai din acest motiv, se pot obține doar predicții probabilistice. În fizica cuantică, însă, această sensibilitate la condițiile inițiale este generică. Acesta este motivul pentru care, de exemplu, nu este interesant să se calculeze traiectoriile particulelor bohmiene. Nu avem de ales decât să ne ocupăm de descrieri probabilistice , deoarece nu putem cunoaște exact condițiile inițiale. În fizica cuantică, modificările minime ale condițiilor inițiale au, în general , consecințe grave pentru evoluția viitoare a sistemelor cuantice. Prin urmare, probabilitățile sunt inerente calculului cuantic în orice caz, datorită ignoranței noastre cu privire la condițiile inițiale exacte, indiferent dacă legea dinamică este deterministă (ecuația Schrödinger și ecuația călăuzitoare în mecanica bohmiană) sau stocastică (ecuația GRW). Prin urmare, este important să ne întrebăm dacă admiterea colapsului funcției de undă ca un proces natural duce la o soluție convingătoare la problema măsurării.

Dacă dinamica este deterministă, putem interpreta probabilitățile în mecanica bohmiană ca în mecanica statistică.

84 Cf. Cowan și Tumulka, 2016.

clasică (vezi secțiunea 3.2): legile dinamice ale teoriei sunt legate de o măsură de probabilitate, cunoscută sub numele de ipoteza echilibrului cuantic, care implică regula lui Born pentru predicțiile rezultatelor măsurătorilor asupra subsistemelor universului. În acest fel, teoria răspunde la întrebarea la ce evoluție a sistemelor fizice ne putem aștepta de obicei, având în vedere ignoranța noastră asupra condițiilor inițiale exacte. În concluzie, putem afirma că nu este în întregime corect, în contextul fizicii cuantice, să încercăm să deducem propoziții despre realitatea care ne înconjoară din algoritmul referitor la operatori (observabile). Acest algoritm este destinat să permită calcularea probabilităților rezultatelor măsurătorilor, dar nu permite deducții despre structura ontologică a lumii (cu riscul de a cădea în capcana problemei măsurării). Reflecția asupra posibilelor soluții la această problemă arată că putem deduce algoritmul formulării standard a mecanicii cuantice, ca în mecanica statistică clasică, din legile naturii care descriu evoluția ființelor locale, independent de procesul de măsurare.

11. FIZICA CUANTICĂ ȘI FIZICA RELATIVĂ

11.1. *Teoria cuantică a câmpurilor*

Teoria care descrie structura materiei la nivel fundamental în fizica teoretică contemporană nu este mecanica cuantică, ci teoria cuantică a câmpurilor; este o încercare de a unifica mecanica cuantică cu relativitatea specială, propunând, în special, o teorie a electrodinamicii cuantice. În general, modelul standard al teoriei cuantice a câmpurilor include toate particulele elementare și elaborează interacțiunile lor în termeni de câmpuri. Cea mai izbitoare caracteristică a acestei teorii este că, în formalismul standard utilizat pentru a face predicții ale rezultatelor măsurătorilor, numărul de particule nu rămâne constant: se observă evenimente de creare și anihilare a particulelor, iar aceste evenimente par să depindă de starea de mișcare a observatorului. Pe de o parte, o ontologie a particulelor pare să fi fost exclusă în acest domeniu: dacă nu există un număr definit de particule care persistă, acestea nu pot fi obiecte fundamentale . Pe de altă parte, nu este deloc clar că ontologia proprie teoriei cuantice a câmpurilor și modelului standard al particulelor elementare are câmpurile ca obiecte fundamentale, deoarece entitățile găsite în formalismul acestei teorii nu sunt clasice: de fapt, ele, în general, nu posedă valori definite în puncte din spațiu-timp cvadridimensional.[85] [86].

Dacă se preferă o ontologie bazată pe câmpuri, problema care se pune este cum să se formuleze o dinamică care să ia în considerare în mod adecvat dovezile experimentale, având în vedere că rezultatele tuturor observațiilor efectuate vreodată constau în poziții definite ale unui anumit tip de obiect - cum ar fi urmele electronilor și pozitronilor într-o cameră de nor sau urmele lăsate de muoni în detectorul ATLAS de la CERN , faimos pentru detectarea particulei Higgs. Pe scurt,

85 Cf. Halvorson și Clifton, 2002; Kuhlmann, 2010, cap. 8; Ruetsche, 2011, cap. 9-11.

86 Cf. Baker, 2009.

În teoria cuantică a câmpurilor, ca în orice altă ramură a fizicii, dovezile experimentale constau în observarea mișcării particulelor. Câmpurile, undele și alte entități intervin doar pentru a explica aceste dovezi.

De fapt, problema măsurării din mecanica cuantică reapare neschimbată în contextul teoriei cuantice a câmpurilor [87]. Orice încercare de a o rezolva trebuie să ia în considerare ceea ce se întâmplă în natură la nivelul proceselor individuale și nu se poate mulțumi cu furnizarea exclusivă de predicții statistice. Mai mult, în teoria cuantică a câmpurilor, reapare problema clasică a relației dintre un câmp și particula care îl creează, ceea ce, așa cum am văzut în secțiunea 4.1, face ca formalismul electrodinamicii clasice să fie inconsistent. Această dificultate poate fi rezolvată cu o procedură matematică cunoscută sub numele de renormalizare, care, însă, având în vedere stadiul actual al cercetării în fizica teoretică, nu conduce la o lege dinamică capabilă să răspundă la întrebarea care procese *individuale* au loc în natură. Cu alte cuvinte, această procedură nu ne ajută să găsim o soluție la problema măsurării.

În ceea ce privește soluțiile la această problemă, situația este aceeași ca în mecanica cuantică. Mai exact, pe de o parte, există un conflict între o teorie bazată exclusiv pe funcția de undă și dezvoltarea acesteia conform unei versiuni relativiste a ecuației Schrödinger (teoria lui Everett sau teoria lumilor multiple) și, pe de altă parte, o teorie care pornește de la existența unei configurații de obiecte în spațiu-timp cvadridimensional și interpretează funcția de undă ca un parametru folosit pentru a descrie evoluția acelei configurații.

În particular, mecanica bohmiană poate fi aplicată și domeniului teoriei cuantice a câmpurilor: există o configurație a unui număr foarte mare, dar finit, de particule caracterizate exclusiv prin pozițiile lor (distanțele care le separă) și prin modificările acestor distanțe; în plus, acestea sunt permanente - adică nu sunt nici create, nici anihilate - și formează ceea ce este cunoscut sub numele de „Marea Dirac". ***Unele*** *dintre* aceste particule pot avea valori negative ale energiei, dar conform acestei teorii, energia este doar un parametru care apare în reprezentarea evoluției distanțelor dintre particule, mai degrabă decât o proprietate intrinsecă a acestora. Prin urmare, valorile negative ale energiei în formalism nu pun probleme de interpretare. Analizând ceea ce afirmă această teorie, dacă particulele din Marea Dirac sunt într-o stare de echilibru, ele nu sunt observabile. Acesta este motivul pentru care această stare se numește „vid", chiar dacă nu este deloc gol, ci plin de particule. Ceea ce este observabil, însă, sunt excitațiile acestei stări de echilibru, care se manifestă prin apariția și dispariția particulelor în și din vid.

87 Cf. Barrett, 2014.

Întrucât starea de echilibru nu este unică, apariția și dispariția particulelor depind de starea de mișcare a observatorului.

Prin introducerea operatorilor de creație și anihilare într-un formalism care implică un număr fix de particule permanente a căror mișcare este guvernată de o lege deterministă (ecuație călăuzitoare), este posibil să se deducă predicțiile statistice ale formalismului standard al teoriei cuantice a câmpurilor. Acest lucru rezolvă și problema măsurării în acest context [88]. Trebuie să găsim o soluție la această problemă, deoarece rezultatele măsurătorilor individuale reprezintă legătura dintre teorie și lumea empirică. Oricare ar fi soluția pe care o adoptăm pentru a rezolva această problemă , aceasta trebuie să depășească formalismul standard al teoriei cuantice a câmpurilor pentru a oferi o descriere a proceselor care au loc în natură. Acest lucru demonstrează încă o dată că este inutil să încercăm să tragem concluzii ontologice dintr-un formalism al operatorilor al cărui scop este doar de a calcula predicții statistice pentru rezultatele observaționale.

11.2. *Nonlocalitate cuantică și fizică relativistă*

Teoria cuantică a câmpurilor combină mecanica cuantică cu teoria relativității speciale, în sensul că predicțiile statistice despre rezultatele măsurătorilor respectă invarianța Lorentz (adică, nu depind de o ordine temporală precisă a evenimentelor separate de un interval spațial). Cu toate acestea, indiferent de formularea teoriei cuantice a câmpurilor pe care o preferăm, ne lipsește o lege dinamică care să respecte această invarianță și să includă o descriere a proceselor de măsurare care duc la rezultate definite ale măsurătorilor.

De fapt, teoria lui Bohm - atât în contextul mecanicii cuantice, cât și al teoriei cuantice a câmpurilor - prescrie o lege fundamentală, și anume ecuația călăuzitoare, care presupune o foliere a spațiu-timpului în hipersuprafețe spațiale ordonate în timp, iar aceasta

88 Cf. Colin și Struyve, 2007; ed. Esfeld și Deckert, 2017, cap. 4.

încalcă invarianța Lorentz prin introducerea simultaneității obiective, deși putem presupune că această foliere este introdusă de funcția de undă universală [89]. Predicțiile statistice ale rezultatelor măsurătorilor sunt însă compatibile din punct de vedere operațional cu invarianța Lorentz. Cu alte cuvinte, această foliere obiectivă nu este accesibilă empiric din cauza cunoștințelor noastre limitate despre pozițiile particulelor, ceea ce ne obligă să recurgem la predicții statistice (vezi secțiunea 10.4).

În teoria GRWf, este posibil să se formuleze structura dinamică astfel încât invarianța Lorentz să fie respectată dacă se ia în considerare distribuția flash-urilor în spațiu-timp [90]. Un rezultat similar poate fi obținut în teoria GRWm pentru distribuția densității materiei [91]. Cu toate acestea, această extensie relativistă nu ne permite să tratăm interacțiunea dintre flash-uri, deoarece se poate demonstra că nu există nicio modalitate de a reprezenta evoluția lor astfel încât să fie invariantă față de Lorentz, adică este necesar să se presupună o ordine temporală definită pentru aceste evenimente, chiar dacă această ordine temporală nu este accesibilă în experimente [92].

Motivul pentru aceasta se găsește în existența corelațiilor dintre evenimente separate de un interval asemănător spațiului, așa cum este evidențiat de teorema lui Bell (vezi capitolul 7). Teoria cuantică nu respectă principiul localității (7.4), care afirmă că toți factorii care pot influența un anumit eveniment sunt localizați în conul său de lumină trecut. Cu toate acestea, ar fi pripit să concluzionăm că fizica cuantică ne obligă să revenim la o structură dinamică newtoniană, bazată pe o corelație instantanee între toate evenimentele din univers care au loc simultan („acțiune la distanță”).

Tensiunea dintre nonlocalitatea cuantică și fizica relativistă constă, în general, în formularea dinamicii în termeni de câmpuri, presupunând că retrocauzalitatea (cauzalitatea din viitor în trecut) este exclusă. Formularea teoriei electrodinamice clasice plasează toate influențele în trecutul imediat al unui anumit eveniment, reprezentând interacțiunile așa cum sunt transmise de câmpuri. În consecință, am formulat premisa localității exact așa cum este propusă în teorema lui Bell, adică astfel încât influențele locale să fie localizate în conul de lumină din trecut al unui anumit eveniment. Așa cum

89 Cf. Diirr *și colab.* , 2014.
90 Cf. Tumulka, 2006.
91 Cf. Bedingham *și colab.* , 2014.
92 Cf. Esfeld și Gisin 2014; și Barrett, 2014.

Deja evidențiată în Capitolul 7, teorema lui Bell stabilește că fizica cuantică încalcă principiul localității (presupunând premisa generală de independență dintre starea trecută a sistemului și parametrul care trebuie măsurat). Este clar, prin urmare, că acest principiu nu este valabil în fizica cuantică: funcția de undă este un parametru de câmp definit în spațiul de configurație, adică este un câmp supus dinamicii locale doar în acel spațiu. Prin urmare, contrar fizicii relativiste, funcția de undă corelează mișcarea particulelor *independent* de distanța lor în spațiul fizic.

Acum, atunci când o structură dinamică a unei teorii fizice date corelează evenimente separate de un interval spațial, este în principiu posibil să se reformuleze o structură echivalentă care implementează acțiuni retrocauzale, adică una care interpretează influența dintre evenimentele separate de intervale spațiale ca fiind transmisă din viitor. O astfel de structură dinamică este într-adevăr relativistă, deoarece toate influențele se găsesc în conurile de lumină, dar nu respectă principiul acțiunii locale al lui Einstein (vezi secțiunea 8.1), adică principiul localității care este valabil în teoria câmpurilor, deoarece orice influență are asupra unui anumit eveniment provine din conurile sale de lumină viitoare și trecute.

În discuția despre electrodinamica clasică, a fost menționată posibilitatea formulării structurii sale dinamice fără parametrul câmpului, sub forma unei interacțiuni directe între particule care ar putea proveni din trecut (interacțiune întârziată) și din viitor (interacțiune avansată) - teoria Wheeler-Feynman (vezi secțiunea 4.2). Prin abandonarea parametrului câmpului, se pierde formularea structurii dinamice care permite rezolvarea ecuațiilor diferențiale în termeni de condiții inițiale precise. Cu toate acestea, în cazul electrodinamicii clasice, ca și în cazul cuantic, se poate concepe în principiu o formulare a structurii dinamice bazată atât pe interacțiunea întârziată, cât și pe cea avansată dintre particule [93]. Teoria lui Bohm permite, de asemenea, o astfel de formulare în principiu [94].

Spre deosebire de electrodinamica clasică, așa cum este ilustrată de teoria Wheeler-Feynman, în cazul cuantic opțiunea acțiunilor anticipate trebuie, totuși, să includă un parametru de câmp în structura dinamică, lucrând cu unde întârziate și anticipate. Permiterea acțiunii anticipate încalcă, de asemenea, premisa de independență menționată anterior a teoremei lui Bell, deoarece nu există independență între starea trecută a sistemului și alegerea parametrului care urmează să fie măsurat. Cu toate acestea, nu există o influență directă între ele, deoarece ambele sunt corelate doar prin influența rezultatelor viitoare ale măsurătorilor. Orice teorie a acțiunii anticipate

93 Cf. Cramer, 2016 pentru cea mai cunoscută formulare fizică, pe lângă Price, 1996, cap. 9; Dowe, 1996 și Corry, 2015 pentru subiecte filosofice.

94 Cf. Sutherland, 2008.

implică o astfel de corelație, iar aceasta, stabilită prin influența viitorului, nu implică neapărat un paradox sau o conspirație.11 O dinamică a interacțiunii directe între particule poate atunci, în principiu, să fie adecvată empiric; dacă este adevărat, totuși, că oferă o dinamică relativistă și pentru cazul cuantic, trebuie să subliniem că include și acțiunea anticipată pe lângă acțiunea întârziată.

11.3. *Direcția timpului*

Indiferent de poziția cuiva cu privire la tensiunea dintre nonlocalitatea cuantică și fizica relativistă, este un fapt că timpul are un statut diferit în dinamica cuantică față de geometria spațiu-timpului cvadridimensional. Acest lucru devine clar atunci când se ia în considerare o dinamică care include colapsul funcției de undă, cum ar fi ecuația GRW. Dacă colapsul funcției de undă descrie un proces care are loc efectiv în natură, atunci este un proces ireversibil. Desigur , este posibil ca obiectele înlănțuite să revină la o stare înlănțuită după un colaps al funcției de undă, dar este imposibil ca un obiect care a dobândit o poziție precisă după colaps să revină imediat la starea în care se afla înainte de producerea procesului de localizare spontană. Prin urmare, se poate spune că ecuația GRW descrie un tip de proces care este intrinsec ireversibil.[95] [96]și, în plus, că această ecuație implică în mod explicit o direcție a timpului, deoarece prezintă o asimetrie temporală.

Mai mult, dacă presupunem o dinamică care include colapsul funcției de undă, ne angajăm să formulăm o lege a naturii care nu este deterministă, ci stocastică. Prin urmare, susținem că există procese ale căror condiții inițiale sunt descrise de funcții de undă identice (de exemplu, emisia a doi electroni în condițiile experimentului descris de Bell), dar ale căror rezultate sunt diferite (de exemplu, în cadrul experimental menționat mai sus, rezultatul măsurătorii va fi „spin-up" în aripa stângă și „ spin - down" în aripa dreaptă într-un caz și invers în celălalt caz). Dacă descrierea condițiilor inițiale ale unui astfel de proces furnizată de funcția de undă este completă, rezultă că diferența dintre rezultatele măsurătorilor poate fi explicată doar prin faptul că acest proces este ireductibil stochastic. În acest caz, luăm în considerare un proces care, spre deosebire de toate celelalte cunoscute în fizica clasică (în care probabilitățile sunt introduse pentru a explica ignoranța noastră cu privire la condițiile inițiale exacte), este el însuși probabilistic. Este un fapt remarcabil că probabilitățile ireductibile și procesele care sunt ireversibile prin construcție apar împreună.

95 Cf. Preț, 1996, cap. 9; și Lazarovici, 2014.
96 Cf. Albert, 2000, cap. 7.

Cu excepția unui anumit tip de lege care implică colapsul funcției de undă, cum ar fi cea observată în cazul teoriei GRW, toate celelalte candidate pentru a deveni legi fundamentale ale naturii descriu procese care sunt intrinsec reversibile. Cu toate acestea, chiar și acestea conțin o asimetrie temporală. Dacă o particulă se mișcă în spațiu de la punctul *a* la punctul *b,* această mișcare este reversibilă: particula se poate întoarce de la *b* la *a* . Nu există o direcție privilegiată în spațiu, deoarece acesta este izotrop; timpul, însă, nu este, deoarece are o direcție. Dacă o particulă se mișcă de la *a* la *b* , timpul curge: particula se găsește în *b* „mai târziu" decât era în *a* . Dacă particula inversează direcția mișcării sale și se întoarce de la *b* la *a* , nu se întoarce în timp. Se va întoarce la *a* „mai târziu" decât era în *b* .

Faptul că legile mecanicii reprezintă toate procesele ca fiind reversibile poate fi înțeles în acești termeni: dacă un proces care duce de la o configurație de particule *a* la o configurație de particule *b* este permis de legile mecanicii, atunci este permis și un proces care duce de la *b* la *a* . Prin urmare, o lege reprezintă un proces ca fiind ireversibil dacă și numai dacă legea permite un proces care duce de la *a* la *b* , dar exclude un proces invers care duce de la *b* la *a* . Nimic din această analiză, însă, nu ne obligă să concluzionăm că, atunci când are loc un proces de la *b* la *a* , nu numai direcția în spațiu, ci și direcția în timp este inversată, astfel încât întoarcerea la *a* are loc înainte de sosirea la *b* . Acest raționament poate fi aplicat întregului univers, considerând că configurația particulelor care trec printr-un proces de deplasare de la *a* la *b* și întoarcere de la *b* la *a* conține toate particulele universului. Din nou, nimic în această situație nu ne obligă să concluzionăm că direcția timpului este inversată atunci când procesul își schimbă direcția spațială.

Totuși, marea majoritate a proceselor care ne sunt familiare sunt ireversibile: viața este un proces de îmbătrânire care nu poate fi inversat; dacă un pahar cade de pe masă, paharul se sparge, dar probabilitatea reconstrucției sale spontane, care i-ar restabili starea inițială, este infinitesimală și așa mai departe. Explicația comună pentru faptul că bucățile de sticlă nu reformează spontan sticla și, prin urmare, nu revin la starea lor inițială este aceasta: energia pe care o poseda sticla este dispersată între un număr mare de bucăți ale căror direcții de mișcare nu sunt coordonate. În vocabularul - termodinamicii, spunem că entropia a crescut, iar entropia este tocmai o măsură a dispersiei energiei. Legile mecanicii nu exclud posibilitatea ca procesul care a dus la spargerea sticlei să poată fi inversat fără nicio intervenție externă. Cu toate acestea, condițiile inițiale pentru inversarea acestui proces nu sunt aproape niciodată satisfăcătoare.

Întrucât condițiile de coordonare a direcțiilor de mișcare a particulelor - care permit formarea sticlei sunt extrem de improbabile, această explicație ridică întrebarea cum poate exista sticlă care ulterior se poate sparge. Răspunsul standard la această întrebare este că, în condițiile inițiale ale

universului, starea inițială a universului este o stare de entropie extrem de scăzută. Această propunere se numește „ipoteza trecutului ” . Pe această bază, putem explica de ce universul se dezvoltă prin creșterea entropiei (a doua lege a termodinamicii), fără ca această dezvoltare să fie reversibilă , chiar dacă legile mecanicii descriu toate procesele ca fiind reversibile [97]. Se poate merge până la a argumenta că, la originea direcției timpului, condițiile inițiale speciale ale universului stau la baza direcției timpului [98], dar nimic nu ne obligă să tragem această concluzie; de exemplu, putem argumenta că timpul ar curge chiar dacă nu ar exista procese ireversibile în univers.

Astfel, se pot distinge patru poziții în raport cu direcția timpului.

1. Direcția timpului nu este fundamentală. Ceea ce ni se pare a fi o direcție temporală se explică prin condiții inițiale specifice ale universului, și anume o stare inițială de entropie foarte scăzută. Această poziție se potrivește bine cu fizica și metafizica universului bloc (vezi secțiunea 6.4), deși nu o implică.
2. Direcția timpului nu este fundamentală, dar schimbarea este, iar schimbarea implică direcție. Ceea ce ni se pare a fi direcția timpului derivă din direcția schimbării, deoarece folosim un parametru temporal pentru a o măsura. Această poziție este o formă de relaționism leibnizian (vezi capitolul 2).
3. Direcția timpului este fundamentală, deși legile naturii nu exprimă această direcție [99].
4. Direcția timpului este fundamentală, iar legile care includ o asimetrie temporală (cum ar fi legea GRW) servesc drept modele pentru legile fundamentale.

11.4. *Gravitația cuantică*

Așa cum am spus, unificarea fizicii cuantice cu teoria relativității speciale pune o problemă din cauza nonlocalității cuantice, deoarece ridică întrebarea dacă structura dinamică fundamentală necesită o ordine temporală obiectivă sau nu, necesitând astfel o foliere privilegiată a spațiu-timpului. Gravitația cuantică este un proiect pentru dezvoltarea unei teorii fizice fundamentale care încearcă să unifice mecanica cuantică cu teoria *relativității generale.* Aceasta din urmă tratează gravitația în termeni de geometrie a spațiu-timpului (și, prin urmare, modelează această interacțiune local): spațiu-

97 Cf. Albert, 2000, cap. 2–4, dar și obiecțiile lui Earman, 2006, la adresa acestei ipoteze.

98 Cf., de exemplu, Field, 2003 și Loewer, 2007.

99 Cf. Maudlin, 2007, cap. 4, și Norton, 2010.

timpul posedă o curbură în virtutea câmpului metric și este el însuși o entitate dinamică (vezi Capitolul 5). Mecanica cuantică și teoria cuantică a câmpurilor, pe de altă parte, sunt teorii nonlocale, deoarece, așa cum am menționat, funcția de undă nu este un câmp local definit în spațiul fizic; în plus, aceste teorii tratează spațiu-timpul ca un fundal nondinamic.

Există mai multe linii de cercetare care vizează formularea unei teorii cuantice a gravitației. Cele mai importante sunt teoria coardelor și gravitația cuantică în bucle [100]. În plus, există încercări de a formula o teorie bohmiană a gravitației cuantice, [101]precum și o teorie relaționalistă inspirată de Leibniz [102]și o teorie care încearcă să reconstruiască spațiu-timpul pornind de la elemente primitive discrete *(teoria mulțimilor cauzale).* În contextul acestei ultime teorii, precum și în special pentru teoria gravitației cuantice în bucle, este comun să se creadă că spațiu-timpul nu este fundamental, ci că este o entitate emergentă.[103 104].

Trebuie [105]însă să fim precauți în privința acestei teze: la prima vedere, este necesar să se facă distincția între o geometrie specifică, cum ar fi cea a unui spațiu-timp cvadridimensional, care este un continuum, și relațiile de distanță care constituie extensia. Chiar dacă primele ar fi doar un mijloc de reprezentare cu un domeniu limitat de aplicații, relațiile de distanță ar putea fi totuși fundamentale. În plus, trebuie să facem distincția între apariția timpului și apariția spațiului. Deja în relaționalismul leibnizian, timpul apare din schimbare (vezi capitolul 2). Prin urmare, apariția timpului, spre deosebire de apariția spațiului, este bine studiată.

Deși se dezvoltă numeroase abordări diferite în domeniul gravitației cuantice , în prezent ne lipsește o teorie consolidată în acest domeniu. Aceste abordări diferite nici măcar nu sunt încă capabile să facă predicții empirice și, din acest motiv, sunt departe de a putea propune o soluție la problema măsurării.

În general, în concluzie, este greșit să încercăm să tragem concluzii ontologice dintr-un formalism ale cărui noțiuni fundamentale sunt cele ale operatorilor. În mecanica cuantică, de exemplu, în ciuda relațiilor de incertitudine ale lui Heisenberg, putem apăra o teorie cu o ontologie a particulelor care au întotdeauna o poziție și o viteză date. În mod similar, în ciuda fenomenelor de creare și anihilare a particulelor din teoria cuantică a câmpurilor, este posibil să apărăm o teorie cu un număr constant de particule.

---

100 Cf. în special Weingard, 2001; Witten, 2001; Kiefer, 2004; Rovelli, 2004 și 2007; Rickies, 2014.

101 Cf. Dürr, Goldstein și Zanghì, 2013, cap. 11 și Vassallo și Esfeld, 2014.

102 Cf. Barbour *et al.* , 2014; Gryb și Thébault, 2016.

103 Vezi, de exemplu, Sorkin, 1991; Reid, 2001.

104 Vezi Huggett și Wuthrich, 2013.

105 Vezi Lam și Esfeld, 2013.

Standardul pentru propozițiile despre natură bazate pe fizica cuantică nu este formalismul operatorilor care permite calcularea predicțiilor statistice ale rezultatelor măsurătorilor , ci soluția propusă la problema măsurării. Această problemă, de fapt, privește fiecare teorie cuantică.

12. LIMITELE ȘTIINȚELOR NATURALE

12.1. *Explicația fenomenelor*

Să revenim la atomism. Prima formulare pe care o cunoaștem, cea a lui Democrit (cca. 460-370 î.Hr.), evidențiază deja explicația fenomenelor naturale oferită de această poziție filosofică:

> [...] în vid, o pluralitate infinită de substanțe indivizibile și nediferențiate, lipsite de calități și afecțiuni, se mișcă într-o ordine împrăștiată. Când se apropie, întâlnindu-se sau împletindu-se, apar aceste agregate, dintre care unul se numește apă, al doilea foc, al treilea plante, celălalt oameni (fragmentul 179, DK 68 A 57).

Ideea este, așadar, că toate obiectele vizibile sunt compuse din particule microscopice indivizibile și că toate diferențele dintre astfel de obiecte (la un moment dat, precum și în timp) sunt explicate prin (i) modul în care aceste particule sunt aranjate în spațiu și (ii) modul în care configurațiile particulelor se schimbă în timp.

Așa cum am văzut și explicat în diversele capitole ale acestei cărți, aceste particule sunt caracterizate prin pozițiile lor relative (adică prin distanțele care le separă și prin modificarea acestor distanțe) și, prin urmare, nu au esențe intrinseci în sensul proprietăților calitative. Această observație este, însă, independentă de interpretarea adoptată în ceea ce privește parametrii de masă, sarcină și energie ca proprietăți ale particulelor, pe de o parte, sau ca aparținând exclusiv structurii dinamice a unei anumite teorii fizice, pe de altă parte (adică, ca parametri care permit o reprezentare simplă și informativă a mișcării particulelor). Mai mult, chiar dacă ar fi proprietăți atribuibile particulelor, nu ar fi proprietăți calitative, ci *dispoziții* capabile să modifice distanțele relative dintre particule într-un anumit fel, date anumite condiții (așa cum, de exemplu, masa gravitațională este o dispoziție de atracție reciprocă între particule).

Caracterizarea obiectelor fizice exclusiv prin intermediul extensiei - adică prin distanțele care le separă - și a

Conceptul de mișcare datează încă de la Descartes, care, procedând astfel, s-a opus filosofiei scolastice din Evul Mediu. Newton a fost primul care a dezvoltat o teorie fizică precisă și universală pe această bază (vezi capitolul 2). Această concepție are ca rezultat deplasarea caracterului calitativ și fenomenal al experienței noastre (de exemplu, culorile, mirosurile, sunetele pe care le percepem) de la natură la nivelul conștiinței noastre. Prin urmare, vorbim despre calități secundare care nu sunt proprietăți ale obiectelor fizice. Conceptualizarea naturii exclusiv în termeni de distanțe dintre punctele materiei (particule) și modificări ale acestor distanțe (mișcare) permite o explicație simplă, elegantă și generală a tuturor proceselor naturale, așa cum subliniază citatul lui Democrit: putem reprezenta fiecare schimbare în natură ca o modificare a distanțelor dintre punctele materiei.

Noțiunea de supravenienţă ne permite să conceptualizăm relația dintre natură așa cum este descrisă de fizică în termeni de particule în mișcare și natură așa cum ne apare în experiența noastră (percepția culorilor, sunetelor, mirosurilor etc.). Dacă *B-urile* supravin peste *A,* atunci când două lucruri, situații etc. sunt identice în raport cu *A* , atunci ele sunt la fel de identice în raport cu *B-urile* . Cu alte cuvinte, nu poate exista nicio diferență între *B-uri* fără să existe o diferență la nivelul A. *Prin* urmare, se poate stabili o dependență asimetrică între experiențele fenomenale, *B-urile* , și variațiile distanțelor dintre particule, A. *Totuși* , aceasta nu înseamnă că poate exista o simplă reducere între cele două niveluri, experiențele fenomenale pe de o parte și variațiile distanțelor dintre punctele materiei pe de altă parte. Rămâne o diferență între o configurație de atomi caracterizată exclusiv în termeni de relații spațiale (și, eventual, în termeni de dispoziții de a schimba aceste relații) și calitățile senzoriale ale experienței. Deci, aceasta înseamnă pur și simplu că putem stabili o corelație stabilă între cele două, permițându-ne să folosim distanțele relative dintre atomi și modificările acestor distanțe pentru *a explica* diferențele dintre calitățile senzoriale ale experienței și modificările acestora. Aceste observații reafirmă faptul că toate rezultatele observațiilor experimentale constau exclusiv din pozițiile relative ale obiectelor care sunt ulterior legate de calitățile fenomenale ale experienței noastre senzoriale.

Într-o scrisoare către Maurice Solovine (1875-1958), Einstein își explică viziunea asupra relației dintre fizică și fenomene în felul următor:

1. Ni se dau *E-urile* (experiențe imediate).
2. *A-urile* sunt axiomele din care tragem concluzii. Din punct de vedere psihologic, A *-urile* se bazează pe *E-uri* . Dar nu există o cale logică de la *E-uri* la *A-uri;* există doar o conexiune intuitivă (psihologică) și întotdeauna „până la o nouă notificare”.
3. Din *enunţele A* putem deduce, prin intermediul unei proceduri deductive, afirmaţii particulare *S* care pot pretinde a fi adevărate.

4. Ss sunt legate de *Es* (verificare prin experiență). Această procedură, la o inspecție mai atentă, aparține ea însă sferei extralogice (intuitive), deoarece relația dintre conceptele care apar în enunțuri și experiențele imediate nu este de natură logică. Totuși, această relație dintre Ss *și Es este* (pragmatic) mult mai puțin incertă decât cea dintre *As* și *Es* (de exemplu, dintre conceptul de câine și experiențele imediate corespunzătoare). Dacă o astfel de corespondență, rămânând inaccesibilă logicii, nu ar putea fi stabilită cu un grad ridicat de certitudine, tot arsenalul logic nu ar avea nicio valoare în scopul „înțelegerii realității" (de exemplu, teologia).

   Aspectul esențial aici este legătura etern problematică dintre lumea ideilor și ceea ce poate fi experimentat – experiența senzorială (Einstein, 1988, p. 743).

Deși Einstein folosește cuvântul „dat" pentru a descrie experiența *E* , el nu cade în capcana mitului lui Sellars (1912–1989; vezi Sellars, 1956) despre dat, deoarece acesta susține clar că relația dintre propoziții și experiență este extralogică. Mai mult, Einstein nu lasă nicio îndoială că axiomele *A* ale teoriilor fizice trebuie postulate; nu le putem deduce din propozițiile care descriu experiența. După postularea axiomelor - cum ar fi cele care stabilesc existența atomilor caracterizați prin distanțele lor relative și legile care le guvernează mișcarea - putem deduce propozițiile *S* care oferă rezultate experimentale și apoi le putem conecta la experiența fenomenală *E.*

Totuși, explicarea fenomenelor nu se realizează prin conceptualizarea configurațiilor particulelor ca atare, ci prin legi dinamice formulate pentru a explica evoluția acestor configurații. De exemplu, o configurație efemeră a particulelor în formă de pisică nu este o pisică; doar o configurație stabilă de acest tip este. Prin urmare, dinamica este cea care asigură stabilitatea obiectelor macroscopice și, procedând astfel, ajută la explicarea fenomenelor. Pe această bază, disputa dintre susținătorii unei ontologii de tip Everett („lumi multiple") pentru mecanica cuantică și susținătorii unei ontologii de tip Bohm (ontologie primitivă în sensul restrâns al materiei distribuite în spațiul fizic, „ființele locale"; vezi capitolul 9) se reduce la următoarea întrebare: pentru a explica existența obiectelor macroscopice, cum ar fi o pisică, este suficient să găsim ceva în funcția de undă universală care prezintă o evoluție ce corespunde funcțional comportamentului tipic al unei pisici, astfel încât această funcție de undă universală (adică starea cuantică a universului pe care îl reprezintă) să poată fi concepută ca materie în univers, chiar dacă această funcție de undă (adică această stare cuantică) există într-un spațiu de foarte mare dimensiune? Sau ar trebui să recunoaștem în ontologie un obiect material, în sensul de a *fi compus* din particule microfizice, astfel încât evoluția acestei configurații de particule să

exemplifice comportamentul tipic al unei pisici? [1]

12.2. *Determinism fizic și determinism metafizic*

Scopul legilor fizicii este de a oferi cea mai simplă și informativă reprezentare posibilă a evoluției configurației particulelor care compun materia. Acesta este motivul pentru care favorizăm legile deterministe: dacă legile sunt formulate sub formă de ecuații diferențiale care admit soluții prin inserarea unor condiții inițiale, atunci, în cazul legilor deterministe, pentru toate condițiile inițiale posibile (intrare), aceste legi dau întreaga evoluție trecută și viitoare a sistemului în cauză (ieșire).

Din această perspectivă, angajamentul față de determinism este deja încorporat în cadrul dinamic al unei teorii fizice. Parametrii dinamici conținuți în legi determină întreaga evoluție trecută și viitoare a unei configurații inițiale date a materiei, iar aceasta este cea mai simplă și informativă modalitate, într-o teorie fizică, de a reprezenta schimbarea care are loc în univers. Este posibil să nu putem realiza o astfel de teorie. Cu toate acestea, dacă avem doar legi stocastice pentru a descrie evoluția unei configurații date, ne putem totuși întreba dacă este posibil să facem mai bine - adică, dacă este posibil să găsim parametri care să fixeze schimbarea. Pentru a reveni la exemplul teoriei cuantice GRW, este o întrebare deschisă dacă prăbușirea funcției de undă, așa cum este modelată în acest context, este ireductibil stochastică sau dacă există un mecanism încă necunoscut care o determină (de exemplu, luarea în considerare a gravitației).[106] [107]Cu alte cuvinte, odată ce avem parametrii care determină în mod unic evoluția unei configurații a materiei, știm că obiectivul a fost atins: am obținut o reprezentare simplă și informativă a schimbării, deoarece descrie toate schimbările trecute și viitoare ale unei anumite configurații a materiei (ieșire), având în vedere o configurație inițială (intrare). Singura întrebare care rămâne deschisă este, prin urmare, dacă teoria este corectă din punct de vedere empiric și dacă simplitatea sa poate fi îmbunătățită în continuare fără a-și pierde conținutul informativ.

Virtuțile unei teorii fizice, cum ar fi simplitatea și caracterul său informativ, nu ar trebui confundate cu angajamente metafizice discutabile. De exemplu, ar fi absurd să criticăm legea gravitației a lui Newton pentru determinismul său, deoarece această lege este simplă și universală. De asemenea, nu putem argumenta împotriva diferitelor interpretări ale teoriei cuantice, cum ar fi cea a lui Everett sau Bohm, pe motiv că acestea sunt

106 Vezi Albert, 2015, capitolele 6 și 7; Maudlin, 2010 și 2015.
107 Vezi Penrose, 1989, cap. 8.

deterministe, în timp ce până în prezent orice teorie care include colapsul funcției de undă este indeterministă . În plus, este posibil să se formuleze și o teorie cuantică stocastică cu traiectorii pentru particule [108], dar aceasta este mai puțin simplă și mai puțin informativă decât mecanica bohmiană.

Determinismul implementat în cadrul dinamic al unei teorii fizice nu are consecințe metafizice în sine. Același lucru este valabil și pentru cadrul dinamic determinist al unei teorii biologice, cum ar fi genetica sau neurobiologia. Chiar și în aceste cazuri, teoriile biologice sau neurobiologice care implementează dinamica deterministă urmăresc să realizeze cea mai simplă și informativă reprezentare posibilă a evoluției sistemelor din domeniile lor. Pe scurt, în aceste cazuri vorbim despre virtuțile teoriilor științifice, nu despre afirmațiile lor metafizice. În general, trebuie să distingem între știință și scientism, înțeles ca utilizarea și aplicarea cadrelor referitoare la reprezentarea lumii naturale pentru studiul și analiza minții umane. Reducând natura la extensie și mișcare, Descartes încearcă să propună o reprezentare care să fie atât simplă, cât și informativă. Această reprezentare deschide astfel calea pentru posibilitatea de a „ne face stăpâni și posesori ai naturii" (*Discurs despre metodă,* Partea a șasea); Spunând aceasta, Descartes vizează în primul rând progresul medical, adică lupta împotriva bolilor. Cu toate acestea, este clar că urmărirea acestui proiect nu are implicații pentru spiritul uman (și în special pentru liberul arbitru).

Dacă din legile naturii se pot deduce consecințe metafizice discutabile, acest lucru nu se întâmplă pe baza acestor legi ca atare, ci datorită interpretării lor metafizice. Dacă se acceptă metafizica lui Hume, determinismul fizic (biologic sau chiar neurobiologic) nu poate avea nicio consecință pentru mintea umană (și în special pentru liberul arbitru), deoarece, conform acestei metafizici, nu există nimic în natură care să determine, să fixeze sau să forțeze particulele să evolueze într-un anumit fel (vezi Capitolul 3). Mișcarea particulelor manifestă *de facto* anumite modele sau regularități, pe baza cărora căutăm să formulăm o structură dinamică care să fie atât simplă, cât și informativă. Dacă această căutare duce la formularea unor legi deterministe, este pentru că știința și-a atins scopul (presupunând că aceste legi sunt reprezentări corecte). În primul rând, există mișcarea particulelor, inclusiv interacțiunile noastre cu natura, și apoi formularea legilor fizice, astfel încât acestea să nu exercite ca atare nicio influență asupra evoluției naturii și, prin urmare, să nu poată intra în conflict cu libertatea noastră [109].

Numai și exclusiv dacă se susține în metafizică poziția conform căreia legile fizicii sunt sau reprezintă entități care intervin în lumea fizică

108 Vezi Nelson, 1966 și 1985.
109 Vezi Beebee și Mele, 2002.

acționând asupra configurației materiei (dacă, de exemplu, se susține că acestea reprezintă dispoziții sau puteri în natură; vezi paragraful 3.3), poate apărea un conflict cu liberul arbitru. Acest lucru se întâmplă numai și exclusiv dacă se apără în filosofia minții o poziție (cu privire la liberul arbitru) cunoscută sub numele de *libertarianism,* în contrast cu compatibilism [110]. Se observă imediat, în plus, că, dacă apare un astfel de conflict, acesta nu depinde deloc de faptul dacă legile fizicii sunt deterministe sau stocastice: în acest ultim caz, faptul că ele determină mișcarea unei anumite configurații a materiei (inclusiv cea a creierului uman) într-o anumită direcție cu o anumită probabilitate, care nu depinde de liberul arbitru, implică existența unui conflict între acesta din urmă și legile naturii, în același mod ca și cum astfel de legi ar fi deterministe [111]. Prin urmare , argumentul care urmărește să stabilească un conflict între legile fizicii, pe de o parte - în special cele deterministe - și libertatea umană, pe de altă parte, este eronat. În general, trebuie făcută o distincție clară între legitimitatea legilor științifice și ideologia științifică.

12.3. *Reducerea funcțională și limitele acesteia*

Discuția noastră despre teoriile fizice s-a bazat pe distincția dintre ontologia primitivă, pe de o parte, și structura dinamică, pe de altă parte. Ontologia primitivă se referă la ceea ce există pur și simplu în lume conform formalismului unei teorii. Structura dinamică, pe de altă parte, include toți parametrii introduși în virtutea funcției îndeplinite pentru a implementa legile mișcării pentru ontologia primitivă (vezi secțiunea 3.1). De exemplu, o configurație a particulelor în mișcare constituie ontologia primitivă a mecanicii newtoniene, în timp ce masa (gravitațională și inerțială) face parte din structura dinamică a acestei teorii, deoarece este introdusă prin funcția pe care o exercită asupra mișcării particulelor (rezistența la accelerație, accelerația gravitațională). Cu toate acestea, ontologia primitivă nu constă neapărat din seturi de obiecte reprezentate într-o geometrie tridimensională sau cvadridimensională. Dacă susținem o teorie cuantică à la Everett, putem spune că un câmp reprezentat de funcția de undă, în ceea ce este considerat în mod normal spațiu de configurație, pur și simplu există și, prin urmare, constituie ontologia primitivă a teoriei în sensul larg al termenului utilizat aici (vezi secțiunea 9.1).

Totuși, ontologia primitivă nu depinde strict de o anumită teorie fizică, așa cum este cazul structurilor dinamice: așa cum arată exemplele mecanicii bohmiene în contextul mecanicii cuantice și al teoriei câmpurilor, este posibil să se susțină o ontologie primitivă a particulelor punctuale în mișcare, - reprezentate într-o geometrie tridimensională sau cvadridimensională, atât

110 Vezi Esfeld, 2012, cap. 8, pentru această dezbatere în filosofia minții.

111 Vezi Loewer, 1996 și Esfeld, 2000.

pentru teoriile fizice care se extind dincolo de domeniul mecanicii newtoniene, cât și pentru teoriile fizicii contemporane. Cu alte cuvinte, pentru a răspunde obiecției meta-inducției pesimiste împotriva realismului științific, o ontologie primitivă a particulelor caracterizate exclusiv prin pozițiile lor relative și schimbările lor este mult mai puțin supusă amenințării antirealiste decât o structură dinamică care variază între diferite teorii fizice. Pe scurt, structura dinamică se schimbă considerabil de la mecanica newtoniană la fizica cuantică, prin intermediul teoriilor relativiste locale ale câmpurilor, în timp ce putem susține că ontologia primitivă rămâne aceeași.

Odată ce ontologia primitivă este definită, se pot introduce parametri pentru a defini ecuațiile de mișcare pentru entitățile teoriei noastre. Acești parametri sunt introduși funcțional în descrierea evoluției temporale a ontologiei primitive în sine. Aceasta implică faptul că aceasta din urmă acționează ca un factor de adevăr pentru toate propozițiile adevărate în care sunt utilizați acești parametri (indiferent dacă li se acordă sau nu un statut ontologic acestor parametri pe lângă elementele ontologiei primitive). De exemplu, dacă ontologia primitivă constă în particule în mișcare, putem introduce noțiunile de masă, sarcină, câmp și așa mai departe prin funcția lor pentru mișcarea particulelor, astfel încât mișcarea reală a particulelor să poată face ca propozițiile în care acești parametri par adevărate. Acest lucru este analog cu funcția de undă ca parametru dinamic în teoriile cuantice care admit o ontologie primitivă distinctă de funcția de undă în sine (ontologia primitivă a „ființelor locale").

Atunci când avem o ontologie primitivă ale cărei elemente servesc drept referenți ultimi pentru teoriile noastre științifice (chiar lăsând deschisă întrebarea despre ce sunt de fapt acești referenți ultimi), putem aplica această procedură și teoriilor unor științe specifice, cum ar fi chimia, biologia și neurobiologia. Toți parametrii acestor teorii pot fi introduși pe baza rolului dinamic pe care îl joacă pentru entitățile ontologiei primitive a fizicii. În cele din urmă, entitățile fizice și evoluția lor ne permit să testăm propozițiile despre natura acestor teorii științifice.

Aceasta nu implică, totuși, că ontologia primitivă este fundamentul cunoașterii noastre științifice. Pentru a reveni la celebrele idei ale lui Quine despre epistemologie, propozițiile care definesc ontologia primitivă sunt situate în apropierea unui centru ipotetic al rețelei noastre de cunoaștere, în timp ce propozițiile care definesc structura dinamică a unei anumite teorii sunt situate mai departe de centru. Dacă există un conflict cu experiența noastră, adică cu propoziții aflate la marginea rețelei noastre de credințe, reformulăm mai întâi structurile dinamice ale teoriilor înainte de a modifica ontologia primitivă.

Totuși, ideea unei ontologii primitive constând din particule punctuale, - caracterizate doar prin pozițiile lor relative și schimbările lor, merge mână în

mână cu conceperea unor legi simple, informative, despre mișcarea acestor particule. Forma pe care o iau aceste legi, însă, se schimbă pe măsură ce cunoștințele noastre se extind sau se modifică prin observații experimentale. Pe scurt, propozițiile care descriu ontologia primitivă sunt justificate, ca toate celelalte propoziții, prin integrarea lor în sistemul coerent al totalității cunoștințelor noastre.

Dacă luăm de bună relația de supravenienţă dintre configurațiile - particulelor (sau dintre configurațiile neuronilor din creier) și stările noastre mentale, putem cu siguranță aplica această metodă de reducere funcțională psihologiei și conceptelor mentale în general, definindu-le ca funcții pentru comportamentul entităților la care se referă. Aceste entități, și anume particulele și mișcarea lor, sunt, în cele din urmă, baza supremă a supravenienței.

Totuși, acest lucru pare să dea naștere unui paradox: încă de la Descartes , am interpretat obiectele fizice ca fiind caracterizate doar prin extensia și mișcarea lor, relegând calitățile senzoriale (cum ar fi culorile, sunetele, mirosurile etc.) la nivelul conștiinței observatorilor. Dacă observatorii, la rândul lor, admit o definiție funcțională pentru parametrii fizici (cum ar fi masa, sarcina, câmpurile, funcțiile de undă etc.) sau pentru parametrii biologici, cum ar fi aptitudinea fizică , operațiunea de relegare a calităților senzoriale ale obiectelor fizice la nivelul conștiinței devine lipsită de sens, deoarece aceste calități ar aparține naturii la fel de mult ca și ceilalți parametri dinamici ai teoriilor fizice.

Din nou, această concluzie este independentă de acordarea statutului ontologic acestor parametri: masa, sarcina și câmpurile sunt parametri atribuiți obiectelor fizice, spre deosebire de culori , sunete, mirosuri etc. Pe scurt, dacă totul, cu excepția elementelor ontologiei primitive, constă din parametri care admit o definiție funcțională, nu are sens să se facă o distincție principială între parametri precum masa, sarcina și câmpurile, pe de o parte, și culorile, sunetele, mirosurile etc., așa cum apar în experiența noastră senzorială, pe de altă parte. Acest paradox este motivul pentru care, în filosofia minții, întrebările privind experiența senzorială, conținutul conceptual al gândurilor noastre și normativitate rămân deschise [112].

112 Vezi în acest sens Esfeld, 2012.

BIBLIOGRAFIE

UN DLER SL
- 2003, *De ce decoerența nu a rezolvat problema măsurării: un răspuns la PW Anderson,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 34, pp. 135-142

ALBERT DZ
- 1992, *Mecanica cuantică și experiența,* Cambridge (MA), Harvard University Press
- 1996, *Metafizică cuantică elementară,* în *Mecanica bohmiană și teoria cuantică: o evaluare,* ed. de JT Cushing, A. Fine, S. Goldstein, Dordrecht, Kluwer, pp. 277-284
- 2000, *Timp și șansă,* Cambridge (MA), Harvard University Press
- 2015, *După fizică,* Cambridge (MA), Harvard University Press

ALBERT DZ , LOWER B.
- 1988, *Interpretarea interpretării multiplelor lumi,* «Synthesis», 77, pp. 195-213

A LLORI V., G OLDSTEIN S., T UMULKA R., Z ANGHI N.
- 2008, *Despre structura comună a mecanicii bohmiene și teoria Ghirardi-Rimini-Weber,* «British Journal for the Philosophy of Science», 59, pp. 353-389
- 2011, *Multe lumi și prima teorie cuantică a lui Schrodinger,* «British Journal for the Philosophy of Science», 62, pp. 1-27
- 2014, *Predicții și ontologie primitivă în fundamentele cuantice: un studiu al exemplelor,* «British Journal for the Philosophy of Science», 65, pp. 323-352

ASPECT A. , DALIBARD J. , ROGER G.
- 1982, *Test experimental al inegalităților Bell folosind analizoare variabile în timp,* «Physical Review Letters», 49, pp. 1804-1807

BACCIAGALUPPI G.
- 2007, *Rolul decoerenței în mecanica cuantică,* în Enciclopedia *de Filosofie Stanford ,* ed. de EN Zalta , http://plato.stanford.edu/entries/qmdecoherence

DJ BAKER
- 2009, *O interpretare a teoriei cuantice a câmpurilor împotriva câmpului* , «British Journal for the Philosophy of Science», 60, pp. 585-609

BALAȘOV Y.
- 2010, *Persistență și spațiu-timp,* Oxford, Oxford University Press, B ARBOR J.
- 2012, *Dinamica formei. O introducere,* în *Teoria câmpului cuantic și gravitația,* ed. de F. Finster, O. Mueller, M. Nardmann, J. Tolksdorf, E. Zeidler, Basel, Birkhaeuser, pp. 257-297

B ARBOUR J., B ERTOTTI B.
- 1982, *Principiul lui Mach și structura teoriilor dinamice,* «Proceedings of the Royal Society A», 382, pp. 295-306
B ARBOUR J. , K OSLOWSKI T., MERCATI F.
- 2014, *Soluția la problema timpului în dinamica formei,* «Gravitație clasică și cuantică», 31, numărul 15, 7 august 2014
BARRETT JA
- 2014, *Inseparabilitate și dezintegrare în mecanica cuantică relativistă,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 48, pp. 168-174
- 2015, *Mecanica ondulatorie pură și însăși ideea de adecvare empirică,* «Sintetizați acestea», 192, pp. 3071-3104
B ARTELS A.
- 1996, *Esențialismul modern și problema individuației punctelor spațio-temporale* , «Erkenntnis», 45, pp. 25-43
BEDINGHAM D, D ÜRR D, G HIRARDI G, G OLDSTEIN S, T UMULKA R , Z ANGHI N.
- 2014, *Densitatea materiei și modele relativiste ale colapsului funcției de undă,* «Journal of Statistical Physics», 154, pp. 623–631
B EEBEE H. , BĂRBATUL A.
- 2002, *Humean compatibilism,* 'Mind', 111, pp. 201–223
BELL JS
- 1964, *Despre paradoxul Einstein-Podolsky-Rosen,* «Fizică», 1, pp. 195-200
- 2010, *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica,* trad. ea. a cura di G. Lorenzoni, Milano, Adelphi
BELL M., G AO S. (ed.)
- 2016, *Non-localitate cuantică și realitate. 50 de ani de la teorema lui Bell, Podul* Cam , Cambridge University Press
BELOT G.
- 1999, *Reabilitarea relaționalismului,* «Studii internaționale în filosofia științei», 13, pp. 35-52
BENNETT J.
- 1984, *Un studiu al eticii lui Spinoza,* Indianapolis, Hackett
BENOVSKY J.
- 2006, *Persistență prin timp* și *prin lumi posibile* , Frankfurt a.M., Ontos-Verlag
B HOGAL H. , PERRY ZR
- 2017, *Ce ar trebui să spună humeanul despre încurcătură,* «Nous», 51, pp. 74-94
B IGELOW J., ELLIS B. , P ARGETTER R.
- 1988, *Forces,* «Filosofia științei», 55, pp. 614-630
PASĂREA A.
- 2007, *Metafizica naturii. Legi și proprietăți,* Oxford, Oxford University Press
BLACK R.
- 2000, *Împotriva quidditismului,* «Australasian Journal of Philosophy», 78, pp. 87-104
B LANCHARD P H ., G UILINI D., J OOS E., K IEFER C., S TAMATESCU I.-O. (ed.)
- 2000, *Decoerență: probleme teoretice, experimentale și conceptuale. Lucrările unui atelier de lucru desfășurat la Bielefeld, Germania, 10-14 noiembrie 1998,* Heidelberg, Springer
BLONDEL C. , WOLFF B.

- 2009, *Amphère și istoria electricității. Teorii matematic echivalente, fizic diferite.* http://www.ampere.cnrs.fr/par- cursuspedagogic/zoom/current/theory/index.php

B OHM D.

- 1951, *Teoria cuantică,* Falezele Englewood, Prentice Hall
- 1952, *O interpretare sugerată a teoriei cuantice în termeni de variabile „ascunse",* «Physical Review», 85, pp. 166-193

B ORN H., B ORN M., E INSTEIN A.

- 2015, *Scienza e Vita. Lettere 1916-1955,* a cura di M. Dorato, Milano, Mimesis

BRICMONT J.

- 2001, *Bayes, Boltzmann și Bohm: probabilități în fizică,* în *Șansa în fizică: Fundamente și perspective,* ed. de J. Bricmont, D. Dürr, MC Galavotti, G. Ghirardi, F. Petruccione, N. Zanghì, Berlin, Springer, pp. 3-21
- 2009, *Mecanica cuantică pentru non-fizicieni,* în *Filosofia mecanicii cuantice,* ed. de J. Bricmont, H. Zwirn, Paris, Vuibert, pp. 1-37
- 2016, *Înțelegerea mecanicii cuantice,* Cham, Springer

B ROWN HR, DEWDNEY CH . , H ORTON G.

- 1995, *Particulele Bohm și detectarea lor în lumina interferometriei neutronice,* „Fundamentele fizicii", 25, pp. 329-347

B ROWN HR, E LBY A. , WEINGARD R.

- 1996, *Cauză și efect în interpretarea undei pilot a mecanicii cuantice ,* în *Mecanica bohmiană și teoria cuantică: o evaluare,* ed. de JT Cushing, A. Fine, S. Goldstein, Dordrecht, Springer, pp. 309-319

BUNGE M.

- 1973, *Filosofia fizicii,* Dordrecht, Reidel

B UTTERFIELD , JN, E ARMAN J. (ed.)

- 2007, *Manual de Filosofie a Științei. Filosofia fizicii. Părțile A și B* , Amsterdam, Elsevier

C ALLENDER C.

- 2007, *Apariția și interpretarea probabilității în mecanica bohmiană,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 38, pp. 351-370
- 2011, *Filosofia științei și metafizica,* în *The Continuum Companion to the Philosophy of Science,* ed. de S. French, J. Saatsi, Londra, Continuum, pp. 33-54
- 2015, *O lume, un posibil,* «Synthesis», 192, pp. 3153-3177

CAROL JW

- 1994, *Legile naturii,* Cambridge, Cambridge University Press, C HAKRAVARTTY A.
- 2013, *Despre perspectivele metafizicii naturalizate,* în *Metafizică științifică,* ed. de D. Ross, J. Ladyman, H. Kincaid, Oxford, Oxford University Press, pp. 27-50

CLIFFORD , WK

- 1876, *Despre teoria spațială a materiei,* în *Proceedings of the Cambridge - Philosophical Society,* 2, pp. 157-158; reimprimat în JR Newman (ed.), *The World of Mathematics. Volumul 1,* New York, Simon and Schuster, 1956 pp. 568-569

COHEN J. , CALLEN C.

- 2009, *O analiză mai bună a legii, cel mai bun sistem,* «Studii Filosofice», 145, pp. 1-34

COLIN S. , STRUYVE W.

- 2007, *Un model Dirac de undă pilot maritimă pentru teoria cuantică a câmpurilor,* «Journal of Physics A», 40 (26), pp. 7309-7341

C ORRY R.

- 2015, *Modele retrocauzale pentru EPR,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 49, pp. 1-9

COWAN CH.W. , TUMULKA R.

- 2016, *Epistemologia colapsului funcției de undă în fizica cuantică,* «British Journal for the Philosophy of Science», 67, pp. 405-434

CRAMER JG

- 2016, *Strângerea de mână cuantică. Entanglement, nonlocalitate și tranzacții,* Cham, Springer

CURCEANU C. *și colab* .

- 2016, *Raze X emise spontan: o semnătură experimentală a modelelor de reducere dinamică* , «Fundamentele fizicii», 46, pp. 263-268

CURLEY EM

- 1988, *În spatele metodei geometrice. O lectură a eticii lui Spinoza,* Princeton , Princeton University Press

DAVID R. , THÉBAULT KPY

- 2014, *Împotriva viabilității empirice a abordării Deutsch-Wallace-Everett a mecanicii cuantice* , «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 47, pp. 55-61

DE BROGLIE L.

- 1928, *Noua dinamică a cuanților,* în *electroni și fotoni. Rapoarte și discuții ale celui de-al Cincilea Consiliu de Fizică, desfășurat la Bruxelles între 24 și 29 octombrie 1927 sub auspiciile Institutului Internațional de Fizică Solvay,* Paris, Gauthier-Villars, pp. 105-132
- 1959, *Interpretarea mecanicii ondulatorii,* „Journal of Physics", 20, pp. 963-979

DECKERT D.-A.

- 2010, *Teoria absorbantului electrodinamic - Un studiu matematic,* Tönning, Der andere Verlag

AL LUI EMOCRIT

- 2007, *Raccolta dei frammenti. Interpretare și comentariu de Solomon Luria,* trad. ea. la cura di D. Fusaro, Milano, Bompiani

DICK P

- 2016, *O introducere critică în realismul științific,* Londra, Bloomsbury ,

DICKSON M.

- 2000, *Există obiecte materiale în teoria lui Bohm?,* «Filosofia științei», 67, pp. 204-210

D IEKS D.

- 2001, *Relaționismul spațio-temporal în fizica newtoniană și relativistă,* « Studii internaționale în filosofia științei», 15, pp. 5-17
- 2006, *Devenire, relativitate și localitate,* în *Ontologia spațiu-timpului,* ed. de D. Dieks, Amsterdam, Elsevier, pp. 157-176

D IZADJI -B AHMANI F

- 2015, *Problema probabilității în mecanica cuantică Everettiană persistă,* «British Journal for the Philosophy of Science», 66, pp. 257-283

DIZADJI - BAHMANI F. , FRIGG R. , HARTMANN S.

- 2010, *Cui îi este frică de reducția nageliană?,* «Erkenntnis», 73, pp. 393-412 D ORATO M.
- 1995, *Timp și realitate. Fizica spațiu-timp și obiectivitatea devenirii temporale,* Bologna, Cooperativa Libraria Universitaria Editrice Bologna.
- 2005, *Software-ul Universului. O introducere în istoria și filosofia legilor naturii,* Aldershot, Ashgate

ÎI DATOREZ LUI PH .
- 1996, *Cauzalitate inversă și direcția proceselor cauzale,* «Mind», 105, pp. 227-248

DOWKER F. , HERBAUTS I.
- 2005, *Statusul funcției de undă în modelele dinamice de colaps,* „Fundamentele - Fizicii, Scrisori", 18, pp. 499-518

D ÜRR D., G OLDSTEIN S., Z ANGHÎ N.
- 2013, FIZICA *cuantică fără filozofie cuantică* , Berlin, Springer DÜRR D.,

GOLDSTEIN S. , NORSEN T., STRUYVE W. , Z ANGHÎ N.
- 2014, *Poate fi mecanica bohmiană relativistă?,* «Proceedings of the Royal Society A», 470 (2162)

DÜRR D. , TEUFEL S.
- 2009, *Mecanica bohmiană: fizica și matematica teoriei cuantice,* Berlin, Springer

DUHEM P.
- 1914, *La théorie physique. Son objet, sa structure,* Paris, Vrin (2 ème ed., retipărire 1981)

E. ARMAN J.
- 1989, *Lumea suficientă și spațiu-timp. Teorii absolute versus relaționale ale spațiului și timpului,* Cambridge (MA), The MIT Press
- 2006, *„Ipoteza trecutului": nici măcar falsă,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 37, pp. 399-430
- 2011, *Ascuțirea săgeții (săgeților) electromagnetice ale timpului,* în *Manualul Oxford de Filosofie a Timpului,* ed. de C. Callender, Oxford, Oxford University Press, pp. 360-391

EARMAN J. , N ORTON J.
- 1987, *„Ce preț costă substantivismul spațio-temporal? Povestea completă",* «British Journal for the Philosophy of Science», 38, pp. 515-525

EGG M. , ESFELD M.
- 2015, *Ontologie primitivă și stare cuantică în teoria densității materiei GRW,* «Synthesis», 192, pp. 3229-3245

E. INSTEIN A.
- 1905, *Despre electrodinamica corpurilor în mișcare,* «Analele fizicii», 17, pp. 891-921
- 1915a, *Explicația mișcării periheliului lui Mercur din teoria generală a relativității,* «Proceedings of the Royal Prusian Academy of Sciences», pp. 831-839
- 1915b, *Ecuațiile de câmp ale gravitației,* «Lucrările Academiei Regale Prusace de Științe», pp. 844-847
- 1948, *Mecanica cuantică și realitate,* «Dialectica», 2, p. 320-324; trad. ea. *Meccanica quantistica e realtà,* în H. Born, M. Born, A. Einstein, *Science e vita. Lettere 1916-1955,* a cura di M. Dorato, Milano, Mimesis 2015

- 1988, *Opere scelte,* a cura di E. Bellone, Torino, Bollati Boringhieri E INSTEIN A. GROSSMANN M.
- 1913, *Schiță a unei teorii generalizate a relativității și a unei teorii a gravitației,* «Journal of Mathematics and Physics», 63, pp. 225-264

E. INSTEIN A. , INFELD L.
- 1949, *Despre mișcarea particulelor în teoria relativității generale,* «Canadian Journal of Mathematics», 1, pp. 209-241

E INSTEIN A. , P ODOLSKY B., ROSEN N.
- 1935, *Poate fi considerată completă descrierea mecanico-cuantică a realității fizice?,* «Physical Review», 47, pp. 777-780

E. SFELD M.
- 2000, *Este indeterminismul cuantic relevant pentru liberul arbitru?,* «Philosophia Naturalis», 37, pp. 177-187
- 2001, *Holismul în filosofia minții și filosofia fizicii,* Dordrecht, Kluwer
- 2012, *La philosophie de l'esprit. Une introduction aux débats contemporains,* Paris, Armand Colin
- 2014, *Humeanismul cuantic sau: fizicalism fără proprietăți,* « Philosophical Quarterly», 64, pp. 453-470
- 2017, *Cum să se explice non-localitatea cuantică: realismul structural ontic și ontologia primitivă a fizicii cuantice,* «Synthese», 194, pp. 2329-2344

ESFELD M. , DECKERT D.-A.
- 2017, O ONTOLOGIE *minimalistă a lumii naturale,* New York, Routledge E. SFELD M., GISIN N.
- 2014, *Teoria fulgerului GRW: o ontologie cuantică relativistă a materiei în spațiu-timp?,* «Filosofia științei», 81, pp. 248-264

E. SFELD M., L. AM V.
- 2008, *Realism structural moderat despre spațiu-timp,* «Synthesis», 160, pp. 27-46
- 2011, *Realismul structural ontic ca metafizică a obiectelor,* în *Structuralismul științific,* o lucrare de A. Bokulich și P. Bokulich, Dordrecht, Springer, pp. 143-159

E SFELD M., L AZAROVICI D., H UBERT M., D ÜRR D.
- 2014, *Ontologia mecanicii bohmiene,* «British Journal for the Philosophy of Science», 65, pp. 773-796

E SFELD M., L AZAROVICI D., L AM V., H UBERT M.
- 2017, *Fizica și metafizica materiei primitive,* «British Journal for the Philosophy of Science», 68, pp. 138-161

EVERETT H.
- 1957, *Formularea stării relative a mecanicii cuantice,* «Reviews of Modern Physics», 29, pp. 454-462; reimprimat în *The Many-worlds Interpretation of Quantum Mechanics,* ed. de BS DeWitt, N. Graham, Princeton, Princeton University Press, 1973, pp. 141-149

F EYNMAN RP
- 1966, *Dezvoltarea viziunii spațio-temporale a electrodinamicii cuantice. Prelegerea Nobel, 11 decembrie 1965,* «Știință», 153, pp. 699-708
- 2000, *Sei pezzi facili,* trad. ea. a cura di L. Servidei, Milano, Adelphi

CÂMP HH
- 1980, *Știință fără numere. O apărare a nominalismului,* Oxford, Blackwell

- 1985, *Putem renunța la spațiu-timp?,* în *Proceedings of the Bienal Meeting of 1984 of the Philosophy of Science Association. Volumul 2,* ed. de P. D. Asquith, P. Kitcher, East Lansing, Philosophy of Science Association, pp. 33-90
- 2003, *Cauzalitatea într-o lume fizică,* în *Manualul Oxford de Metafizică,* ed. de M. Loux, D. Zimmerman, Oxford, Oxford University Press, pp. 435-460

FRANCEZĂ S.
- 2014, *Structura lumii. Metafizică și reprezentare,* Oxford, Oxford University Press

FRIGG R. , WERNDL CH .
- 2011, *De ce tipicitatea nu explică abordarea echilibrului,* în *Probabilități , cauze și tendințe în fizică,* ed. de M. Suarez, Dordrecht, Springer, pp. 77-93

FRISCH M.
- 2005, *Inconsistență, asimetrie* și *non-localitate. O investigație filosofică a electrodinamicii clasice,* Oxford, Oxford University Press

G FIECARE PT
- 1965, *Câteva probleme despre timp,* „Proceedings of the British Academy", 51, pp. 321-336

G HINS M.
- 1990, *Liniaritate și spațiu-timp absolut de la Newton la Einstein. O analiză filosofică,* Bruxelles, Palais des Academies

GIRARDI G.
- 2005, *O privire asupra cărților lui Dumnezeu. Întrebările pe care știința modernă le pune omului,* Milano, il Saggiatore

GHIRARDI G. , GRASSI R. , B ENATTI F.
- 1995, *Descrierea lumii macroscopice: Închiderea cercului în cadrul programului de reducere dinamică,* «Fundamentele fizicii», 25, pp. 5-38

G HIRARDI G., RIMINI A. , W EBER T.
- 1986, *Dinamică unificată pentru sisteme microscopice și macroscopice,* «Physical Review D», 34, 2, pp. 470-491

G IULINI D., J OOS E., K IEFER C., K UPSCH J., S TAMATESCU I.-O., Z EH , HD
- 1996, *Decoerența și apariția unei lumi clasice în teoria cuantică,* Berlin, Springer

GOLDSTEIN S.
- 2006, *Mecanica bohmiană,* în *Stanford Encyclopedia of Philosophy,* ed. de EN Zalta, http://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm
- 2012, *Tipicalitate și noțiuni de probabilitate în fizică,* în *Probabilitatea în fizică,* ed. de Y. Ben-Menahem, M. Hemmo, Berlin, Springer, pp. 59-71

GOLDSTEIN S. , NORSEN T. , TAUSK DV , Z ANGHÎ N.
- 2011, *teorema lui Bell,* http://www.scholarpedia.org/article/Teorema-lui-Belars

GOLDSTEIN S. , STRUYVE W.
- 2007, *Despre unicitatea echilibrului cuantic în mecanica bohmiană,* «Journal of Statistical Physics», 128, pp. 1197-1209

GOMES H. , KOSLOWSKI T.
- 2013, *Întrebări frecvente despre dinamica formei,* «Fundamentele fizicii», 43, pp. 1428-1458

G ÎL LAUDĂ PE JC
- 1971, *Fundamentele conceptuale ale teoriei relativității contemporane,*

Cambridge (MA), The MIT Press
GRYB S. , THÉBAULT KPY
- 2016, *Timpul rămâne,* «British Journal for the Philosophy of Science», 67, pp. 663-705
GUAY A. , PRADEU T.
- 2017, *Direct din cutie: Cum să situăm metafizica științei în raport cu alte abordări metafizice,* «Synthese», DOI 10.1007/s11229017-1576-8
H ALL DECKERT D.-A. , W ISEMAN HM
- 2014, *Fenomene cuantice modelate prin interacțiuni între mai multe lumi clasice,* «Physical Review X», 4, 041013
H ALL N.
- 2009, *Reducționismul lui Hume despre legile naturii,* http://philpapers.org/rec/halhra
H. ALVORSON H., C. LIFTON RK
- 2002, *Nu există loc pentru particule în teoriile cuantice relativiste?,* «Filosofia științei», 69, pp. 1-28
HARRINGTON J.
- 2008, *Relativitatea specială și viitorul: O apărare a punctului prezent,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 39, pp. 82-101
H ARTZ GA
- 1989, *Leibniz despre motivul pentru care metafizica corpului a lui Descartes este în mod necesar falsă,* în *Cercetări leibniziene: un grup de eseuri,* ed. de N. Rescher, Lanham, University of America Press, pp. 23-36
HEISENBERG W.
- 1976, *I princtpi fisici della teoria dei quanti,* trad. ea. a cura di M. Ageno, Torino, Boringhieri
HELLER M.
- 1990, *Ontologia obiectelor fizice: Bucăți de materie în patru dimensiuni,* Cambridge, Cambridge University Press
HENSON J.
- 2013, *Neseparabilitatea nu rezolvă problema teoremei lui Bell,* «Fundamentele fizicii», 43, pp. 1008-1038
H ESSE MB
- 1961, *Forțe și câmpuri. Conceptul de acțiune la distanță în istoria fizicii,* Londra, Nelson
HOEFER C.
- 1996, *Metafizica substantivalismului spațio-temporal,* «Journal of Philosophy», 93, pp. 5-27
H SPRE D.
- 1985, *Einstein despre localitate și separabilitate,* «Studii de istorie și filozofie a științei», 16, pp. 171-201
- 1989, *Holism, separabilitate și implicațiile metafizice ale experimentelor Bell,* în *Consecințele filozofice ale teoriei cuantice. Reflecții asupra teoremei lui Bell,* ed. de JT Cushing, E. McMullin, Notre Dame, University of Notre Dame Press, pp. 224-253
HUGGETT N.

- 2006, *Explicația regularității spațiu-timpului relațional,* «Mind», 115, pp. 41-73

H UGGETT N., W UTHRICH C H .

- 2013, *Spațiu-timpul emergent și (in)coerență empirică,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 44, pp. 276-285

J AMMER M.

- 1957, *Concepte de forță: un studiu asupra fundamentelor dinamicii,* Cambridge (MA), Harvard University Press

KIEFER C.

- 2004, *Gravitație cuantică,* Oxford, Oxford University Press

K. UHLMANN M.

- 2010, *Constituenții ultimi ai lumii materiale, în căutarea unei ontologii pentru fizica fundamentală,* Frankfurt a.M., Ontos

LADYMAN J.

- 1998, *Ce este realismul structural?,* «Studii de istorie și filozofie a științei moderne», 29, pp. 409-424
- 2002, *Înțelegerea filosofiei științei,* Londra, Routledge
- 2007, *Despre identitatea și diversitatea obiectelor dintr-o structură,* «Proceedings of the Aristotelian Society», Supl. Vol. 81, pp. 23-43

LADYMAN J. , Ross D.

- 2007, *Totul trebuie să dispară: Metafizica naturalizată,* Oxford, Oxford University Press

L. AM V., E. SFELD M.

- 2013, *O dilemă pentru apariția spațiu-timpului în gravitația cuantică canonică* , «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 44, pp. 286-293

LANG M.

- 2002, *O introducere în filosofia fizicii: Localitate, câmpuri, energie și masă,* Oxford, Blackwell

L. AZAROVICI D.

- 2014, *Un model retrocauzal relativist care încalcă inegalitatea lui Bell,* «Proceedings of the Royal Society A», 471, DOI 10.1098/rspa.2014.0454

LAZAROVICI D. , R EICHERT P.

- 2015, *Tipicalitate, ireversibilitate și statutul legilor macroscopice,* «Erkennt nis», 80, p. 689-716

LEHMKUHL D.

- 2016, *Metafizica supra-substantivalismului,* « Nous», 53, pp. 24-46 LEIBNIZ GW
- 2000, *Corespondența Leibniz-Clarke,* în *Scrieri filozofice,* voi. III, editat de M. Mu gnai, E. Pasini, Torino, Utet, p. 487-556

LEWIS D.

- 1970, *Cum să definim termenii teoretici,* «Journal of Philosophy», 67, pp. 427-446 ; retipărit în D. Lewis, *Philosophical Papers. Volumul 1,* Oxford, Oxford University Press, 1983, pp. 78-95
- 1973 a, *Contrafactuale,* Oxford, Blackwell
- 1973b, *Cauzalitate,* «Journal of Philosophy», 70, pp. 556-567; reimprimat în D. Lewis, *Philosophical Papers. Volumul 2,* Oxford, Oxford University Press, 1986, pp. 159-172
- 1986a, *Lucrări filozofice. Volumul 2,* Oxford, Oxford University Press

- 1986b, *Despre pluralitatea lumilor,* Oxford, Blackwell
- 1994, *Depanarea supravenienței humiene,* «Mind», 103, pp. 473-490; ristampato în D. Lewis, *Lucrări de metafizică și epistemologie* , Cambridge, Cambridge University Press, 1999, pp. 224-247
- 2004, *Cauzalitatea ca influență,* în *Causation and Counteractuals* , ed. de J. Collins, N. Hall, LA Paul, Cambridge (MA), The MIT Press, pp. 75-106
- 2009, *Umilința ramseyană,* în *Analiză conceptuală și naturalism filosofic,* ed. de D. Braddon-Mitchell, R. Nola, Cambridge (MA), The MIT Press, pp. 203-222

LOCKWOOD M.
- 1989, *Mintea, creierul și cuantica. Compusul I,* Oxford, BLACKWELL LOWER B.
- 1996, *Eliberarea de fizică: mecanica cuantică și liberul arbitru,* «Subiecte filozofice», 24, pp. 91-112
- 2007, *Contrafactuale și a doua lege,* în *Cauzalitate, fizică și constituția realității. Republica lui Russell revizuită,* ed. de H. Price, R. Corry, Oxford, Oxford University Press, pp. 293-326

MACH E.
- 1968, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico,* trad. ea. a cura di A. D'Elia, Torino, Boringhieri

MASSIN O.
- 2009, *Metafizica forțelor,* «Dialectica», 63, pp. 555-589

MAUDLIN T.
- 1989, *Esența spațiu-timpului,* în *Lucrările Bienalei din 1988 a Asociației de Filosofie a Științei. Volumul 2,* ed. de A. Fine, J. Leplin, East Lansing, Asociația de Filosofie a Științei, pp. 82-91
- 1995, *Trei probleme de măsurare,* «Topoi», 14, pp. 7-15
- 2007, *Metafizica în cadrul fizicii,* Oxford, Oxford University Press
- 2010, *Poate lumea să fie doar o funcție de undă?,* în *Many Worlds? Everett, Teoria cuantică și realitate,* ed. de S. Saunders, J. Barrett, A. Kent, D. Wallace, Oxford, Oxford University Press, pp. 121-143
- 2011, *Non-localitate și relativitate cuantică,* Chichester, Wiley-Blackwell, a treia ed.
- 2012, *Filosofia fizicii: spațiu și timp,* Princeton, Princeton University Press
- 2014, *Studiu critic al lui David Wallace, Multiversul emergent: teoria cuantică conform interpretării Everett,* «Noûs», 48, pp. 794-808
- 2015, *Universalul și localul în teoria cuantică,* «Topoi», 34, pp. 349-358

MCTAGGART JE
- 1908, *Irealitatea timpului,* «Minte», 68, pp. 457-474

MILLER E.
- 2014, *Inseparabilitate cuantică, mecanică bohmiană și supraviețuire humeană* , «Australasian Journal of Philosophy», 92, pp. 567-583

MISNER C H .W .
- 1974, *Câteva subiecte pentru cercetarea filosofică privind teoriile - geometrodinamicii matematice și ale geometrodinamicii fizice,* în *Proceedings of the Biennial Meeting of the 1972 Philosophy of Science Association,* ed. de KF Schaffner, RS Cohen, Dordrecht, Reidel, pp. 7-29

M ISNER C H .W., T HORNE KS, W HEELER JA

- 1973, *Gravitație,* San Francisco, Freeman
M ONTON B.
- 2004, *Problema ontologiei pentru teoriile colapsului spontan,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 35, pp. 407-421
M. ORGANTI M.
- 2013, *Combinând știința și metafizica. Fizică contemporană, revizuire conceptuală și cauză comună,* Basingstoke, Palgrave Macmillan
MUMFORD S.
- 1998, *Dispoziții,* Oxford, Oxford University Press
- 2004, *Legi în natură,* Londra, Routledge
MUNDY B.
- 1989, *Acțiunea la distanță în teoria electromagnetică clasică,* «British Journal for the Philosophy of Science», 40, pp. 39-68
NELSON E.
- 1966, *Derivarea ecuației Schrödinger din mecanica newtoniană,* «Physical Review», 150, pp. 1079-1085
- 1985, *Fluctuații cuantice,* Princeton, Princeton University Press , NEWTON I.
- 1978, *Scritti di ottica,* trad. ea. a cura di A. Pala, Torino, Utet
- 1989, *Principii matematici di filosofia naturale,* trad. ea. a cura di A. Pala, Torino, Utet
- 1995, *De la gravitation,* trad. ea. a cura di M.-F. Biarnais, Paris, Gallimard
- 2010, *Lettera di Newton a Bentley, 25 februarie 1692/3,* în *Quattro lettere di Newton a Bentley,* trad. ea. a cura di A. Moretti
NEW A.
- 2012, *Metafizica neo-pozitivistă,* «Studii filosofice», 160, pp. 53-78 N ORSEN T.
- 2005, *Cutiile lui Einstein,* «American Journal of Physics», 73, pp. 164-176
- 2014, *Perspectiva undei pilot asupra spinului,* «American Journal of Physics», 82, pp. 337-348
N ORTON J.
- 2010, *Timpul trece cu adevărat,* «Humana Mente», 13, p. 23-34
O LDOFREDI A., L AZAROVICI D., DECKERT D.-A. , E SFELD M.
- 2016, *De la univers la subsisteme: De ce mecanica cuantică pare mai stocastică decât mecanica clasică,* «Fluctuații și scrisori de zgomot», 15, 3, 164002, pp. 1-16
PENROSE R.
- 1989, *Noua minte a împăratului. Despre computere, minți și legile fizicii* , Oxford, Oxford University Press
P OOLEY O.
- 2001, *Relaționalismul reabilitat? II: Relativitatea,* http://philsci-archive.pitt.edu/221/
- 2013, *Abordări substantiviste și relaționaliste ale spațiu-timpului,* în *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics,* ed. de RW Batterman, Oxford, Oxford University Press, pp. 522-586
P OOLEY O. , BROWN H.
- 2002, *Relaționalismul reabilitat? I: Mecanica clasică,* «British Journal for the Philosophy of Science», 53, pp. 183-204
P. RICE H.
- 1996, *Săgeata timpului și punctul lui Arhimede. Noi direcții pentru fizica timpului,*

Oxford, Oxford University Press
PUTNAM H.
- 1967, *Timeandphysicalgeometry,* «Journal of Philosophy», 64, p. 240-247 P YLKKANEN P., H ILEY BJ, P ATTINIEMI I.
- 2015, *Abordarea și individualitatea lui Bohm* , în *Individuals Across the Sciences,* ed. de A. Guay, T. Pradeu, Oxford, Oxford University Press, pp. 226-246
RAY C.
- 1991, *Timp, spațiu și filosofie* , Londra, Routledge R EICHENBACH H.
- 1956, *Direcția timpului,* Berkeley, University of California Press R EID DD
- 2001, *Introducere în seturile cauzale: o perspectivă alternativă asupra structurii spațiu-timp,* «Canadian Journal of Physics», 79, pp. 1-16
RICKLES , DEAN
- 2014, *O scurtă istorie a teoriei coardelor: de la modele duale la teoria M,* Dordrecht, Springer
RICKLES D. (ed.)
- 2008, *Companionul Ashgate pentru filosofia contemporană a fizicii* , Aldershot, Ashgate
R INDLER W.
- 2001, *Relativitate. Specială, generală și cosmologică,* Oxford, Oxford University Press
ROVELLI C.
- 1997, *La jumătatea drumului prin pădure: cercetări contemporane asupra spațiului și timpului,* în *Cosmosul științei,* ed. de J. Earman, J. Norton, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, pp. 180-223
- 2004, *Gravitație cuantică,* Cambridge, Cambridge University Press
- 2007, *Gravitația cuantică,* în *Manualul de filosofie a științei. Filosofia fizicii. Partea B.* , ed. de JN Butterfield, J. Earman, Amsterdam, Elsevier, pp. 1287-1329
RUETSCHE L.
- 2011, *Interpretarea teoriilor cuantice. Arta posibilului,* Oxford, Oxford University Press
RUSSELL B.
- 1969, *ABC-ul relativității . Editat de Felix Pirani,* Londra, Allen & Unwin

S AUNDERS S.
- 2002, *Cum contrazice relativitatea prezentismul,* în *Time, Reality and Experience,* ed. de C. Callender, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 277-292
- 2013, *Regândirea Principiilor lui Newton,* «Filosofia științei», 80, pp. 22-48

SAUNDERS S. , BARRETT J., KENT A. , WALLACE D. (ed.)
- 2010, *Multe lumi? Everett, Teoria cuantică și realitatea,* Oxford, Oxford University Press

SCHIFF J. , POIRIER B.
- 2012, *Mecanică cuantică fără funcții de undă,* „The Journal of Chemical Physics", 136 (3), 031102

S. CHLOSTHAUER M.
- 2007, *Decoerența și tranziția de la cuantic la clasic,* Berlin, SPRINGER

SCHRÖDINGER E.
- 1935, *Situația actuală în mecanica cuantică, «* Științe naturale », 23, pp. 807-812, 823-828, 844-849

SEBENS CH .
- 2015, *Mecanica cuantică ca fizică clasică,* „Filosofia științei", 82, pp. 266-291

DEPUTATUL SEEVINCK
- 2010, *Pot teoria cuantică și relativitatea specială coexista pașnic?,* http://arxiv.org/abs/1010.3714

SEEVINCK MP , U FFINK J.
- 2011, „ *A nu arunca copilul odată cu apa din cadă: condiția lui Bell de cauzalitate locală, matematic „clară și clară",* în *„Explicație, predicție și confirmare. Tendințe noi și vechi reconsiderate",* ed. de D. Dieks, W. Gonzalez, S. Hartmann, T. Uebel, M. Weber, Dordrecht, Springer, pp. 425-450

S ELLARS W
- 1956, *Empirismul și filosofia minții,* în *Minnesota Studies in the Philosophy of Science,* vol. I: *Fundamentele științei și conceptele de psihologie și psihanaliză,* ed. de H. Feigl, M. Scriven. Minneapolis, University of Minnesota Press, pp. 253-329

S. KLAR L.
- 1974, *Spațiu, timp și spațiu-timp,* Berkeley, University of California Press, S IDER

T H .R.
- 2001, *Cvadridimensionalism . O ontologie a persistenței și timpului,* Oxford, Oxford University Press

S ORKIN RD
- 1991, *Spațiu-timp și seturi cauzale,* în *Relativitate și gravitație: clasică și cuantică,* ed. de JC d'Olivo, E. Nahmad-Achar, M. Rosenbaum, MP Ryan, LF Urrutia, F. Zertuche, Singapore, World Scientific, pp. 150-173

STACHEL J.
- 1974, *Ascensiunea și declinul geometrodinamicii,* în *Proceedings of the Bienal Meeting of 1972 of the Philosophy of Science Association,* ed. de KF

Schaffner, RS Cohen, Dordrecht, Reidel, pp. 31-54 (Studii Bostoniene în Filosofia Științei, 20)
— 1993, *Semnificația covarianței generale. Povestea găurii,* în *Probleme filosofice ale lumilor interne și externe. Eseuri despre filosofia lui Adolf Gruenbaum,* ed. de J. Earman, I. Janis, GJ Massey, N. Rescher, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, pp. 129-160
STEIN H.
— 1968, *Despre spațiu-timp Einstein-Minkowski,* «Journal of Philosophy», 65, PP. 5-23
— 1991, *Despre teoria relativității și deschiderea către viitor,* «Filosofia științei», 58, pp. 147-167
SUTHERLAND , RHODE Island
— 2015, *Modelul Bohm cauzal simetric,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 39, pp. 782-805
T ITTEL W., B RENDEL J., G ISIN B., H ERZOG T., Z BINDEN H., G ISIN N.
— 1998, *Demonstrație experimentală a corelațiilor cuantice pe mai mult de 10 kilometri,* «Physical Review A», 57, 5, pp. 3229-3232
TORRETTI R.
— 1999, *Filosofia fizicii,* Cambridge, Cambridge University Press. T UMULKA R.
— 2006, *O versiune relativistă a modelului Ghirardi-Rimini-Weber,* «Journal of Statistical Physics», 125, pp. 821-840
U FFINK J.
— 2007, *Compendiu asupra fundamentelor fizicii statistice clasice* , în *Manual de filosofie a științei. Filosofia fizicii. Partea B.,* ed. de J. Butterfield, J. Earman, Amsterdam, Elsevier, pp. 923-1047
V. ȘI F. RAASSEN B.
— 1991, *Mecanica cuantică: o perspectivă empiristă,* Oxford, Oxford University Press
VASSAL A.
— 2015, *Poate fi mecanica bohmiană independentă de context?,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 52, pp. 242-250
V ASSALLO A. , DECKERT D.-A., E SFELD M.
— 2017, *Relaționalism despre mecanică bazat pe o ontologie minimalistă a materiei,* «European Journal for Philosophy of Science», 7, pp. 299-318
VASSALLO A. , E. SFELD M.
— 2014, *O propunere pentru o ontologie bohmiană a gravitației cuantice,* «Fundamentele fizicii», 44, pp. 1-18
— 2016, *Relaționalismul eebnizian pentru fizica relativistă generală,* «Studii de istorie și filozofie a fizicii moderne», 55, pp. 101-107
VASSALLO A. , I P PH
— 2016, *Despre problemele conceptuale legate de noțiunea de dinamică bohmiană relațională* , «Fundamentele fizicii», 46, pp. 943-972
V. IGIER J.-P.
- 1955, *Recherche sur l'interprétation causale de la théorie des quanta,* Paris, Gauthier-Villars

VON NEUMANN J.
- 1932, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik,* Berlin, Springer W
ALLACE D.
- 2008, *Filosofia mecanicii cuantice,* în *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics,* ed. de D. Rickles, Aldershot, Ashgate, pp. 16-98
- 2012, *Multiversul emergent. Teoria cuantică conform interpretării Everett,* Oxford, Oxford University Press
- 2014, *Viață și moarte în cozile funcției de undă GRW,* arXiv:1407.4746 (ph-quant)
WEINGARD R.
- 2001, *Un filosof analizează teoria corzilor,* în **Fizica întâlnește filosofia la scara Planck**, ed. de C. Callender, N. Huggett, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 138-151
WEYL H.
- 1949, *Filosofia della matematica e delle scienze naturali,* trad. ea. a cura di A. Caracciolo, Torino, Boringhieri
WHEELER JA
- 1962a, *Geometrodinamică,* New York, Academic Press
- 1962b, *Spațiul gol curbat ca material de construcție al lumii fizice: o evaluare,* în *Logică, Metodologie și Filosofia Științei. Lucrările Congresului Internațional din 1960,* ed. de E. Nagel, P Suppes, A. Tarski, Stanford, Stanford University Press, pp. 361-374
WHEELER JA , F EYNMAN RP
- 1945, *Interacțiunea cu absorbantul ca mecanism al radiației,* «Reviews of Modern Physics», 17, pp. 157-181
WILSON A.
- 2013, *Probabilitatea obiectivă în mecanica cuantică Everettiană,* «British Journal for the Philosophy of Science», 64, pp. 709-737
WILSON J.
- 2007, *Forțe newtoniene,* «British Journal for the Philosophy of Science», 58, pp. 173-205
WITTEN E.
- 2001, *Reflecții asupra soartei spațiu-timpului,* în *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* , ed. de C. Callender, N. Huggett, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 125-137
WOOLHOUSE RS
- 1994, *Cartesio și natura corpului,* «British Journal for the History of Philosophy», 2.1, pp. 19-33

INDICE ANALITICO

Adler, Ștefan 93
Albert, David Z. 98, 100, 104, 122, 124
Lauri, Valia 35, 99, 101
Anaximandru 13
Anaximene 13
Aristotel 9, 13, 14, 15
Armstrong, David M. 44
Aspect, Alain 82, 83
atomism 13, 16, 17, 23, 28, 127 acțiune la distanță 45, 87, 103, 114, 1 20
acțiune timpurie 49, 121, 122
acțiune locală 45, 54, 55, 85-88, 111, 1 21
acțiune întârziată 49

Bacciagaluppi, Guido 92
Baker, David J. 117
Balașov, Iuri 69
Barbour, Julian 32, 49, 72, 125
Barrett, Jeffrey A. 97, 118, 120
Bedingham, Daniel 120
Beebee, Helen 132
Bell, John S. 80-84, 94, 95, 99, 101, 104, 107, 109, 111, 114, 120-122
Benatti, Fabio 102
Bennett, Jonathan 62, 63
Benovsky, Jiri 69
Bertotti, Bruno 32
Bhogal, Harjit 112
Pasăre, Alexandru 39
Black, Robert 43
Blanchard, Philippe 92
Bohm, David 78, 80, 106-115, 118 119, 121, 125, 129, 131, 133
Bohr, Niels 15, 75, 93
Născut, Max 75, 85, 91, 95, 104, 108, 113, 116
Brown, Harvey R. 87, 109 buco, argomento del 57, 58, 61

Callender, Craig 112
Carnap, Rudolf 69
Cartesio 14, 15, 24, 61, 128, 131, 135
Clarke, Samuel 23
Clifford, William K. 62
Clifton, Rob 117
Colin, Samuel 119 colapsul funcției de undă 76, 79, 87, 93, 94, 97, 98, 100, 102, 104, 106, 107, 115, 122, 123, 130, 131
con de lumină 51-53, 59, 68, 76, 80, 84, 120, 121
Copenhaga, Școala din 93 Corry, Richard 121
Cowan, Charles W. 115
Cramer, John G. 121
Curceanu, Cătălina 104
Curley, Edwin M. 62

Dalibard, Jean 82
Dawid, Richard 100 de Broglie, Louis 74, 76, 107 Deckert, Dirk-André 23,43, 119 decoerență 91, 92, 97-99, 111
Democrit 16, 127, 128 determinism 130, 121

Dieks, Dennis 60, 70
Dirac, Paul AM 118, 119 direcția timpului 122-125 aranjamente 23, 39, 40, 42, 44, 47, 127, 128, 132
Dizadji-Bahmani, Foad 100
Golden, Mauro 68, 70
Dowe, Phil 121
Dowker, Fay 112
Dürr, Detler 107, 108, 127

Earman, Ioan 57, 124
Ou, Matthias 104
Einstein, Albert 14, 15, 50, 54, 57, 58, 71, 74, 75, 77-80, 85, 86-88, 103, 104, 111, 112, 121, 128, 129
electrodinamică clasică 36, 112, 118, 120
încurcare 79, 87-89, 91-93, 96, 97, 101, 113
experiență senzorială 128, 135 eternism 67, 68
Everett, Hugh 129, 131, 133

efect de telecomandă fantomă 75
Feynman, Richard 17, 48, 49, 121
Câmp, Hartry 47, 60, 124
Franceză, Steven 24

Galileo, Galileo 22, 50, 51
Geach, Peter 70
Geometrodinamică 64, 65
Ghirardi, Giancarlo 100, 102, 105
Gisin, Nicolas 120
Giulini, Domenico 92
Goldstein, Sheldon 107, 108, 125
Gomes, Henrique de Andrade 72
Grassi, Renata 102
Graves, John C. 65
gravitație cuantică 125, 126
Grossman, Marzel 57
GRW, teoria lui 100, 102-106, 112, 115, 120, 122, 123, 125, 130
Gryb, Sean 72, 125

Hall, Ned 41, 113
Halvorson, Hans 117
Hamilton, William 37, 87
Harrington, James 70
Hartz, Glenn 61
Heisenberg, Werner 15, 75, 77, 93, 115, 126
Heller, Marcu 69
Henson, Iosif 87
Herbauts, Isabelle 112
Hesse, Mary B. 61
Hoefer, Carl 57
Howard, Don 87
Huggett, Nick 31, 126
Hume, David 40-44, 49, 112, 113, 132

identită degli indiscernibili 23, 24
Infeld, Leopold 71
Ip, Pui Him 114
ipoteza din trecut 124

Kiefer, Claus 125
Koslowski, Tim 72
Kuhlmann, Meinard 117

Ladyman, James 24
Lam, Vincent 24, 126
Lazarovici, Dustin 37, 122
Lebesgue, Henri 37
Lehmkuhl, Dennis 59, 66
Leibniz, Gottfried W. 10, 14, 15, 22 24, 28, 29, 31, 32, 57, 58, 61, 71, 72, 125, 126
Leucip 16
Lewis, David 41-44, 69
Loewer, Barry 44, 98, 124, 132
Lorentz, Hendrik 46, 51, 87, 99, 119, 120

Mach, Ernst 28, 30, 34, 59
Maudlin, Tim 33, 39, 57, 84, 88, 91, 93, 100, 104, 105, 125, 130
Maxwell, James C. 45, 46, 49, 50, 54, 85

McTaggart, John E. 66, 67
Mere, Alfred 132
metafizică 13-16, 61, 66, 68-72, 124, 131, 132
Metafizica lui Hume 40-44, 112, 113

1 32
Metafizica suprahumeană 43 Meta-inducția pesimistă 133 Michelson, Albert A. 50 Miller, Elizabeth 112 Misner, Charles W. 65
măsură, problemă a 77, 85, 88, 91 93, 96-98, 100, 101, 103, 107, 108, 114-116, 118, 119, 126
mitul datelor 129
Molière 40 lumi posibile 44 Monton, Bradley 104 Morley, Edward 50 Mumford, Stephen 39

Nelson, Edward 131
Newton, Isaac 9-11, 14-23, 28, 29 31, 32, 34, 36, 45, 49, 50, 53, 54, 57, 62, 64, 72, 87, 120, 128, 131, 1 33
nonlocalitate cuantică 76, 84, 87, 106, 109, 114, 119, 120, 122
Norsen, Travis 77, 109
Norton, Ioan 57, 125

holism dinamic 110, 111
holism cuantic 87, 110
holism semantic 111
ontologie primitivă 34-36, 38, 41, 42, 44, 48, 49, 72, 101, 107, 112-115, 129, 133-135

Penrose, Roger 130
Perry, Zee 112
Fizică 13, 95
Planck, Max 87, 108
Platon 14, 15
Podolski, Boris 77, 78
Poirier, Proiectul de lege 113
Pooley, Oliver 60

prezentism 66, 68
Preț, Huw 121, 122 probabilitate 36-38, 42, 74-76, 81-84, 89, 91, 99, 100, 101, 103, 104, 108, 113-116, 123, 124, 132 propoziții contrafactuale 36, 44, 48, 113 Putnam, Hilary 68 Pylkkänen, Paavo 109

Quine, Willard VO 69, 134

Ramsey, Frank P 41 realism științific 42, 133 realism structural ontic 24 Reichenbach, Hans 69 Reichert, Paula 37 Reid, David D. 126 relativitate generală 47, 54, 55, 57-61, 64, 69, 71, 72, 85, 125 relativitate specială 50, 51, 53-55, 67, 69, 117, 119, 125 relaționalism 23, 24, 27-29, 31, 32, 33, 60, 71, 72, 125, 126 reducere funcțională 133, 135 Rimini, Alberto 100, 105 Roger, Gérard 82 Rosen, Nathan 77, 78 Ross, Don 24 Rovelli, Carlo 60, 125 Ruetsche, Laura Bertran 169

Saunders, Simon 68
Schiff, Jeremy 113
Schlosshauer, Maximilian A. 92
Schrödinger, Erwin 74, 75, 87-93 96, 97, 99, 100-103, 108, 111, 113, 115, 118
Sebens, Charles 113 găleată, experimentul de 22, 29 Seevinck, Michiel P. 81
Sellars, Wilfrid 129 Separabilitate 85, 86-88, 111 dinamica formei 32

Sider, Theodore 68, 69
sistemul de referință 21, 22, 30, 50 53, 67
Sklar, Lawrence 61, 63 solipsism 68
Solovine, Maurice 128 supervenience 128, 134, 135
Sorkin, Rafael D. 126 substanțialism 33, 46, 56-58, 60, 71 suprapunere 74, 75, 78, 79, 86, 89, 90, 93, 96, 103, 108
Spinoza, Baruch 61, 62, 63
Stachel, Ioan 65
Stein, Howard 68 structură dinamică 34, 36, 38, 40-42, 48, 49, 56, 72, 78, 107, 112-114, 120, 121, 125, 127, 130-134

Struyve, Ward 108, 119 supra-substanțialism 61, 63,65
structură excedentară 23, 59
Sutherland, Roderick I. 121

Thales 13 teoria cuantică a câmpurilor 46, 94,
117-119, 125, 126
Teufel, Stefan 107
Thebault, Karim 72, 100, 125
Thorne, Kip S. 65
Tittel, Wolfgang 83
Tumulka, Roderich 104, 115, 120

blocul universului 68-72, 124

van Fraassen, Bas 20
Vassallo, Antonio 32, 35, 72, 114, 125
von Neumann, John 93

Wüthrich, Christian 126
Wallace, David 99, 100, 104
Weber, Tullio 100, 105
Weingard, Robert 125
Weyl, Hermann 71
Wheeler, John A. 48, 64, 65
Wheeler-Feynman, teoria di 48, 49, 121
Wilson, Jessica 100
Witten, Edward 125
Woolhouse, Roger S. 61

Zanghi, Nino 107, 108, 125

Fizică

Seria de filosofie

Massimo Donà
SPUNE SUFLETUL
Despre natura cunoașterii
2016 | pp. 96 | hârtie 12,00 € | carte electronică 5,99 €

Germana Pareti, Antonio G. Zippo
CE SĂ FAC, CÂND SĂ FAC, DACĂ SĂ FAC
O investigație asupra proceselor ascunse ale actului voluntar. Prefață de Giovanni Berlucchi.
2016 | pp. 144 | hârtie 14,00 € | carte electronică 6,99 €

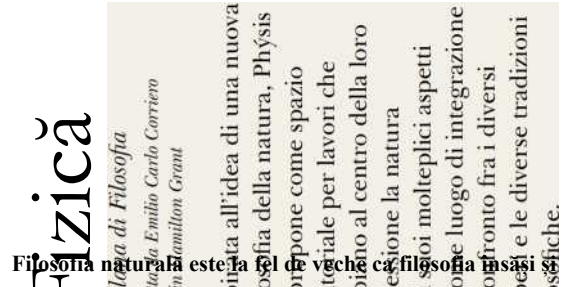
Iain Hamilton Grant
FILOZOFII ALE NATURALITĂȚII POST-SCHELLING
editat de Emilio Carlo Corriero
postfață de Maurizio Ferraris
2017 | pp. 320 | hârtie 24,00 € | carte electronică 8,99 €

Massimo Cacciari, Emilio Carlo Corriero, Manfred Frank, Iain Hamilton Grant, Wolfram Hogrebe, Hans Jorg Sandkühler, Jason Wirth
LIBERTATE ȘI NATURĂ
Perspective schellingiene
editat de Emilio Carlo Corriero
2017 | pp. 160 | hârtie 15,00 € | carte electronică 7,49 €

Wolfgang Wieland
FIZICA LUI ARISTOTEL
Studii asupra fundamentelor științelor naturii și pe fundamentele lingvistice
prefață de Vincenzo Vitiello
2018 | pp. 400 | hârtie 28,00 € | carte electronică 9,99 €

Emilio Carlo Corriero
Vertijul rațiunii
Schelling și Nietzsche
prefață de Massimo Cacciari
2018 | pp. 240 | hârtie 18,00 € | carte electronică 7,99 €

Michael Esfeld
FILOZOFIA NATURALULUI
Fizică și ontologie
prefață de Mauro Dorato
2018 | pp. 160 | hârtie 13,50 € | carte electronică 5,99 €



Filosofia naturală este la fel de veche ca filosofia însăși și a fost întotdeauna legată de cercetarea științifică a naturii. Știința și filosofia au un scop comun: înțelegerea naturii. Scopul acestei cărți este de a oferi o imagine de ansamblu asupra filosofiei naturale contemporane, începând cu filosofia naturală a lui Newton și apoi luând în considerare teoria câmpurilor împreună cu fizica relativității, ajungând în final la fizica cuantică.

Un text strălucit și accesibil care, așa cum susține Mauro Dorato în prefața sa, este „de o importanță enormă pentru a avea o imagine de ansamblu actualizată asupra filosofiei contemporane a fizicii".

Michael Esfeld predă filosofia științei la Universitatea din Lausanne, Elveția. ***http://www.michaelesfeld.com***

6. *Fizică și ontologie relativistă*
   6.1. Super-substanțialism
   6.2. Geometrodinamică